

题目：FFT-DLTS测试系统的研制与金属硅化物电学性质的研究

关键词：快速傅立叶变换，深能级瞬态谱，迭代法，金属硅化物，快速热退火

摘要：

建立了计算机控制的快速傅立叶深能级瞬态谱测试系统，对该方法所存在的问题进行了研究，并提出了新的方法。（用该系统首次对金属硅化物在硅中引进的缺陷进行了测试，结合其它的电学特性测试结果，给出了 NiSi_2/Si 反向漏电流大的主要原因。）

相对于传统深能级瞬态谱(DLTS)方法，快速傅立叶变换深能级瞬态谱(FFT-DLTS)方法具有灵敏度高，分辨率高等特点，但是由于用 FFT-DLTS 方法在处理多能级 DLTS 系统时存在着系统误差从而限制了该方法的应用。本论文论证了该误差产生的原因并提出用迭代法来解多能级的傅立叶系数谱的方法，从而不仅有效的解决了传统 FFT-DLTS 方法所存在的问题，而且能级分辨率又有显著提高。

用离子束溅射及快速热退火方法制得金属硅化物，但该工艺有可能在硅中引入新的缺陷，通过对金属硅化物所形成的肖特基势垒结构进行 C-V、I-V、以及 FFT-DLTS 的测试与分析，可得出这些深能级缺陷是形成反向漏电流大的主要原因。

分类号：O472⁺.5

Title: FFT-DLTS system and electronic properties of Silicide

Keywords: FFT (fast Fourier transform), DLTS (deep level transient system), iterative, Silicide, RTA (rapid temperature annealing)

Abstract

In this work, the fast Fourier transform deep level transient spectroscopy measure system controlled by computer was fabricated. The trouble of new method was investigated and in order to resolve it, a new method was proposed. The trap of Si imported by silicide is measured by the system. Comparing other electronic properties, the main reason of the leakage of NiSi₂/Si were also given.

The fast Fourier transform deep level transient spectroscopy (FFT-DLTS) method has the advantages of high sensitivity and high resolution. However, when this method is explored to process the experimental data with the overlapped signals from two deep levels, there is unavoidable error that limits the wide application of this method. In this work, the origin of the error is analyzed and an iterative method is suggested to decompose the Fourier coefficient spectrum with double energy levels. The experimental measurements and data processing demonstrate the validity of this iterative FFT-DLTS technique.

The Silicide was fabricated by using Ion Sputtering and RTA method. But using these methods will maybe import new traps in Si. The electrical characteristics of Schottky barrier structure made of Silicide were studied by using C-V, I-V, and FFT-DLTS method. New deep level traps were detected, and the traps provide large leakage of samples.

第一章：快速傅立叶变换深能级瞬态谱测试系统

1.1 引言

深能级瞬态谱(DLTS)方法是 D.V.Lang^[1]在 1974 首次提出。该方法能够准确地测量出半导体材料中的深能级位置，缺陷浓度分布，俘获截面等重要物理参数，以后该方法又被发展成为对低维半导体材料物理性质进行研究，如对量子阱的量子限制能级的位置及能带偏移的确定^[2]，量子点中库仑荷电效应的研究^[3]。

与此同时 DLTS 测试技术也在不断的改进和发展，最初 DLTS 信号的产生是通过锁相放大器或取样平均器是对瞬态电容信号进行率窗处理后再输出^[1]。随着计算机技术的发展，瞬态电容信号可以直接输入到计算机存储起来，再通过计算机进行数据处理便可以得到各种不同的 DLTS 信号，这样只需要一次温度扫描便可以获得所需的参数，大大减少了测试时间，并提高了实验结果的准确性。

为了提高 DLTS 的分辨率与精度，人们又提出了多种数值处理方法，其中有拉普拉斯变换方法^[4]和快速傅立叶变换方法^[5]。根据取样点数的不同，这两者都能够给出令人满意的结果，只是在计算上，傅立叶变换方法可以采用比较成熟的快速方法，免去了大量的积分运算，更适合于实时操作。

我们采用快速傅立叶变换方法对瞬态电容曲线进行实时处理，建立了一套计算机控制的快速傅立叶变换方法深能级瞬态谱测试系统。在理论上通过模拟的方法对 FFT-DLTS 进行研究，发现了 FFT-DLTS 方法在处理多能级系统时，当多能级的傅立叶系数峰位比较近时会出现系统误差，同时也分析了该系统误差产生的原因。我们首次提出用迭代的方法对傅立叶系数谱进行解谱，不仅可以消除该系统误差，而且还可显著提高谱的分辨率。最后本文通过一个实验例子来加以验证，并对 FFT-DLTS 方法与 DLTS 方法进行了简单的比较。

1.2 FFT-DLTS 的基本原理

1.2.1 单能级结构

在深能级瞬态信号测试中，瞬态电容随时间 t 的变化关系可表示为：[6]

$$\Delta C(t) = \Delta C(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1-1)$$

其中 $\Delta C(0)$ 是瞬态电容衰减幅度， τ 是时间常数，它是缺陷能级 ΔEt 上的载流子发射几率 e 的倒数，并表示为：[6]

$$e = \frac{1}{\tau} = \gamma \sigma T^2 \exp\left(-\frac{\Delta Et}{K_b T}\right), \quad (1-2)$$

$$f(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (1-3)$$

式中 K_b 是玻尔兹曼常数， ΔEt 是缺陷深能级至导带底或价带顶的距离， σ 是缺陷的俘获截面， γ 是常数。在实验测试中，在以 T_w 为周期的反向脉冲电压触发下，瞬态电容信号亦成为周期变化，周期为 T_w 。(1-1)式中的瞬态电容同样可以表示为以 T_w 为周期的连续可微函数，对其进行傅立叶变换，其系数为：

$$c_n = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \exp(-in\omega t) dt \quad (1-4)$$

其中 $\omega = \frac{2\pi}{T_w}$ 。 c_n 可以写作余弦系数 a_n 与正弦系数 b_n 的组合：

$$c_n = \frac{1}{2}(a_n - ib_n) \quad n \geq 0 \quad (1-5)$$

当 $f(t)$ 为实数时， a_n 以及 b_n 也为实数，并可表示为：

$$a_0 = \frac{2A}{T_w} \left[1 - \exp\left(-\frac{T_w}{\tau}\right)\right] \tau + 2B \quad (1-6)$$

$$a_n = \frac{2A}{T_w} \left[1 - \exp\left(-\frac{T_w}{\tau}\right)\right] \frac{\frac{1}{\tau}}{\frac{1}{\tau^2} + n^2 \omega^2} \quad (1-7)$$

$$b_n = \frac{2A}{T_w} [1 - \exp(-\frac{T_w}{\tau})] \frac{n\omega}{\frac{1}{\tau^2} + n^2\omega^2} \quad (1-8)$$

由于时间常数 τ 是温度的函数, 因此傅立叶系数也是随温度变化而变化, 如图 1-1(a)所示。傅立叶系数谱图中峰位的位置与时间常数 τ 及瞬态周期 T_w 有关, 在通常 DLTS 测试过程中是固定 T_w , 改变样品环境温度从而改变瞬态电容的时间常数, 从而得到随时间变化的傅立叶系数谱。不难推算, 对于某一指数衰减信号, 如果知道该电容瞬态过程的傅立叶系数, 就可以计算出该瞬态信号的时间常数 τ ,

$$\tau(a_n, a_k) = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{a_n - a_k}{k^2 a_k - n^2 a_n}} \quad (1-9)$$

$$\tau(b_n, b_k) = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{kb_n - nb_k}{k^2 nb_k - n^2 kb_n}} \quad (1-10)$$

$$\tau(a_n, b_n) = \frac{1}{n\omega} \frac{b_n}{a_n} \quad (1-11)$$

由 1-9, 1-10, 1-11 式可以看出只要选取两个傅立叶系数, 就可以求出该瞬态曲线的时间常数。理论模拟计算表明, 所选取的傅立叶系数级次越低, 计算所得的时间常数 τ 的误差也就越小, 一般而言时间常数 $\tau(a_i, b_j)$ 具有最小的计算误差^[5], 所以一般选取 $\tau(a_i, b_j)$ 来计算时间常数。由于噪声的存在, 在傅立叶系数谱图中, 峰值附近的信噪比最大, 并随远离峰值而下降。因此对于 τ 的计算必然存在着一定的范围, 该范围随着信噪比的提高而增大。

从傅立叶系数随温度变化的图谱中, 由(1-11)式可以计算出时间常数 $\tau(a_i, b_j)$ 随温度的变化, 并由 1-2 式可得 $\ln(\tau^2) - 1/(K_b T)$ 图(Arrhenius 图), 如图 1-1(b)所示, 取合适的线性区域, 计算其斜率即可求出 ΔE_t 。

利用 1-7, 1-8 式可推导出信号幅度与傅立叶系数的关系为:

$$A = \frac{T_w}{2} b_n \frac{\exp(\frac{1}{\tau})}{1 - \exp(-\frac{T_w}{\tau})} \frac{1}{n\omega} \quad (1-12)$$

与传统 DLTS 的方法相同同样可以计算出俘获截面, 深能级浓度等参数。

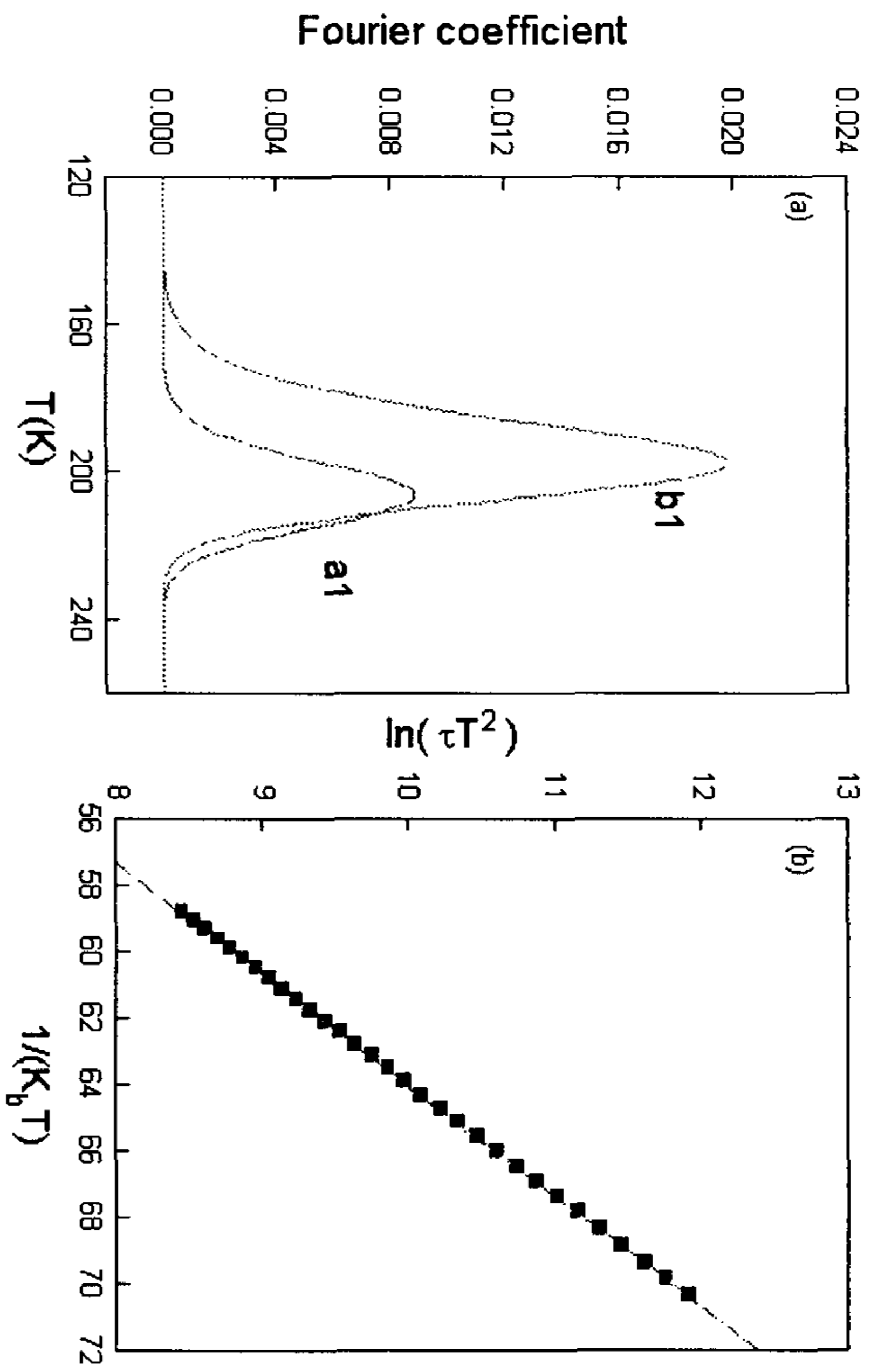


图 1-1(a) 模拟的单能级傅立叶系数谱图 $\Delta E_i = 0.30 \text{ eV}$, $\sigma = 0.8 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$,
 1-1(b) Arrhenius 谱图.

1.2.2 双能级系统

当半导体材料中，存在两个深能级缺陷分别位于 ΔE_{11} 与 ΔE_{12} 处，则瞬态电容信号为两个指数信号的迭加，并可表示为：

$$f(t) = A_1 \exp(-\frac{t}{\tau_1}) + A_2 \exp(-\frac{t}{\tau_2}) + B \quad (1-13)$$

其中：

$$e_1 = \frac{1}{\tau_1} = \gamma \sigma_1 T^2 \exp(-\frac{\Delta E_{11}}{k_b T}) \quad (1-14)$$

$$e_2 = \frac{1}{\tau_2} = \gamma \sigma_2 T^2 \exp(-\frac{\Delta E_{12}}{k_b T}) \quad (1-15)$$

对 $f(t)$ 进行 FFT 变换得：

$$a_n = a_{1n} + a_{2n} \quad (1-16)$$

$$b_n = b_{1n} + b_{2n} \quad (1-17)$$

即双能级的傅立叶系数为二个单能级的傅立叶系数之和。图 1-2(a)显示了双能级的傅立叶系数随温度的变化图。图中的两个能级位置分别为 $\Delta E_{11}=0.30eV$ 、 $\Delta E_{12}=0.43eV$ 。利用(1.11)式计算出 $\tau(a, b)$ 得到 $\ln(\omega T^2) - 1/(K_b T)$ 图，如图 1-2(b)所示，图中可明显分辨出两个线性区域，传统 FFT-DLTS 方法简单的认为可以从这两个线性区域的斜率与截距，分别求出两个深能级的能级位置和俘获截面。但实际上如果选取图中所选的两个线性进行计算，所得结果分别为 $\Delta E_{11}=0.278eV$ 、 $\Delta E_{12}=0.429eV$ ，显然深能级 ΔE_{11} 有比较明显的误差，并且这一误差会随着傅立叶系数峰位的接近而进一步增大。以下将具体分析，产生该误差的原因。对于双能级，(1-11)式可表示为：

$$\tau(a_n, b_n) = \frac{1}{n\omega} \frac{b_{1n} + b_{2n}}{a_{1n} + a_{2n}} = \tau(a_{1n}, b_{1n}) \frac{1 + \frac{b_{2n}}{b_{1n}}}{1 + \frac{a_{2n}}{a_{1n}}} = \tau(a_{2n}, b_{2n}) \frac{1 + \frac{b_{1n}}{b_{2n}}}{1 + \frac{a_{1n}}{a_{2n}}} \quad (1-19)$$

如果当时间常数 τ_1 与 τ_2 相差比较大时，在傅立叶系数谱上就表现为两个能级所对应的傅立叶系数峰位分的很开，没有发生重叠。在能级 1 所对应的傅立叶系数谱峰的范围， $a_{2n} = 0$ ， $b_{2n} = 0$ ，则 $b_{2n}/b_{1n} = 0$ ， $a_{2n}/a_{1n} = 0$ 由(1-19)式可得 $\tau(a_{1n}, b_{1n}) = \tau(a_n, b_n)$ 。同理在能级 2 所对应的傅立叶系数谱峰范围内有 $a_{1n} = 0$ ，

$b_{1n}=0$, 则 $\tau(a_{2n}, b_{2n}) = \tau(a_n, b_n)$ 。因此在 $\ln(iT^2) - 1/(K_b T)$ 图中选取合适的线性区域计算得出的能级位置等物理量不存在误差。但是当 τ_1 与 τ_2 相差不是很大时, 在傅立叶系数谱上就表现为傅立叶系数峰发生部分重叠, 如图 1-2(a)所示, 此时即使两个能级的傅立叶系数的微小迭加, 也会引起较大的系统误差。定义重叠因子 ρ 来表示傅立叶系数双峰的重叠度, ρ 即是二能级的傅立叶系数之和与其中一个能级的傅立叶系数的比值如: $\rho_1 = (b_{11} + b_{21})/b_{11}$ 和 $\rho_2 = (b_{11} + b_{21})/b_{21}$, 显然如果 $\rho=1$, 则代表傅立叶系数谱峰没有重叠。如果 $\rho > 1$, 则一个能级的傅立叶系数将会被另外一个能级的傅立叶系数所影响。并且会引入误差, 误差会随着重叠因子 ρ 的增大而增大。

表 1-1. 双能级系统的重叠因子和深能级的计算误差的关系:

Energy Level	T(K)	ρ_1	$\tau(a_1, b_1) / \tau(a_{11}, b_{11})$	Error
1	185.9	1.0523	1.0511	10.7%
	187.9	1.0617	1.0598	
	189.9	1.0737	1.0707	
	191.8	1.0882	1.0845	
	193.7	1.1072	1.1024	
	195.5	1.1317	1.1250	
Energy Level	T(K)	ρ_2	$\tau(a_1, b_1) / \tau(a_{21}, b_{21})$	Error
2	235.0	1.0012	0.9970	0.23%
	236.5	1.0017	0.9985	
	238.0	1.0000	0.9991	
	239.6	1.0000	0.9995	
	241.1	1.0000	1.0000	
	242.7	1.0000	1.0000	

表 1-1 列出了图 1-2(b)中随温度变化的两线性区域中 ρ_1 和 ρ_2 的值, 其中 $\tau(a_i, b_i)$ 由双能级系统计算得出, $\tau(a_{11}, b_{11})$ 和 $\tau(a_{21}, b_{21})$ 分别由两单能级系统计算得出。从表 1-1 可得在所选温度范围内对于能级 ΔE_{11} , ρ_1 和 $\tau(a_i, b_i) / \tau(a_{11}, b_{11})$ 有 5-13 % 的误差, 从而导致了深能级位置与理想值有 10% 的误差, 然而对于能级 ΔE_{12} , ρ_2 和 $\tau(a_i, b_i) / \tau(a_{21}, b_{21})$ 其误差仅千分之几, 能级的计算误差就可忽略不记。

与 DLTS 方法相比, 由于计算方法的不同, 在相同样品和实验条件下, 由 FFT-DLTS 计算方法所产生的误差要比 DLTS 大的多。

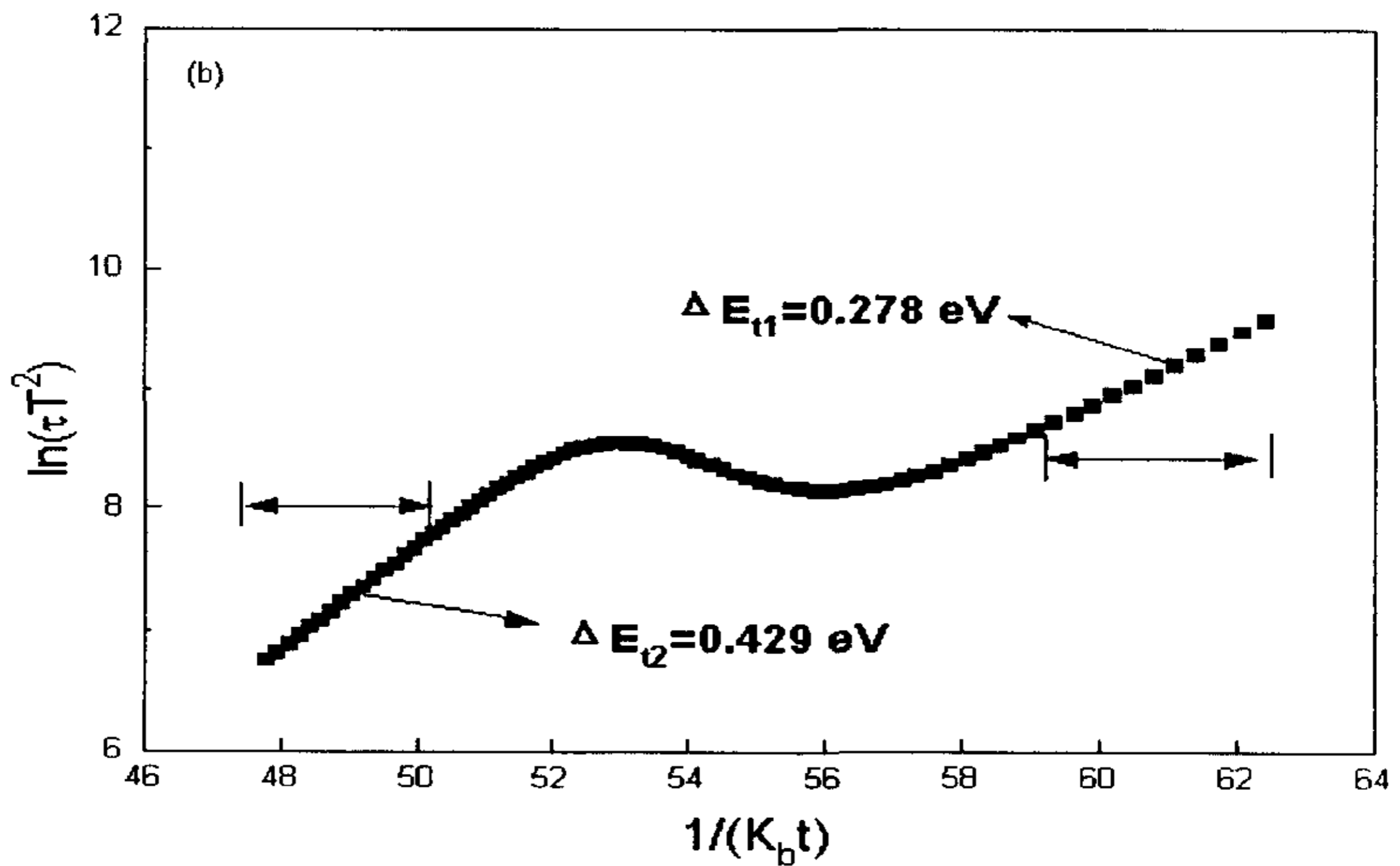
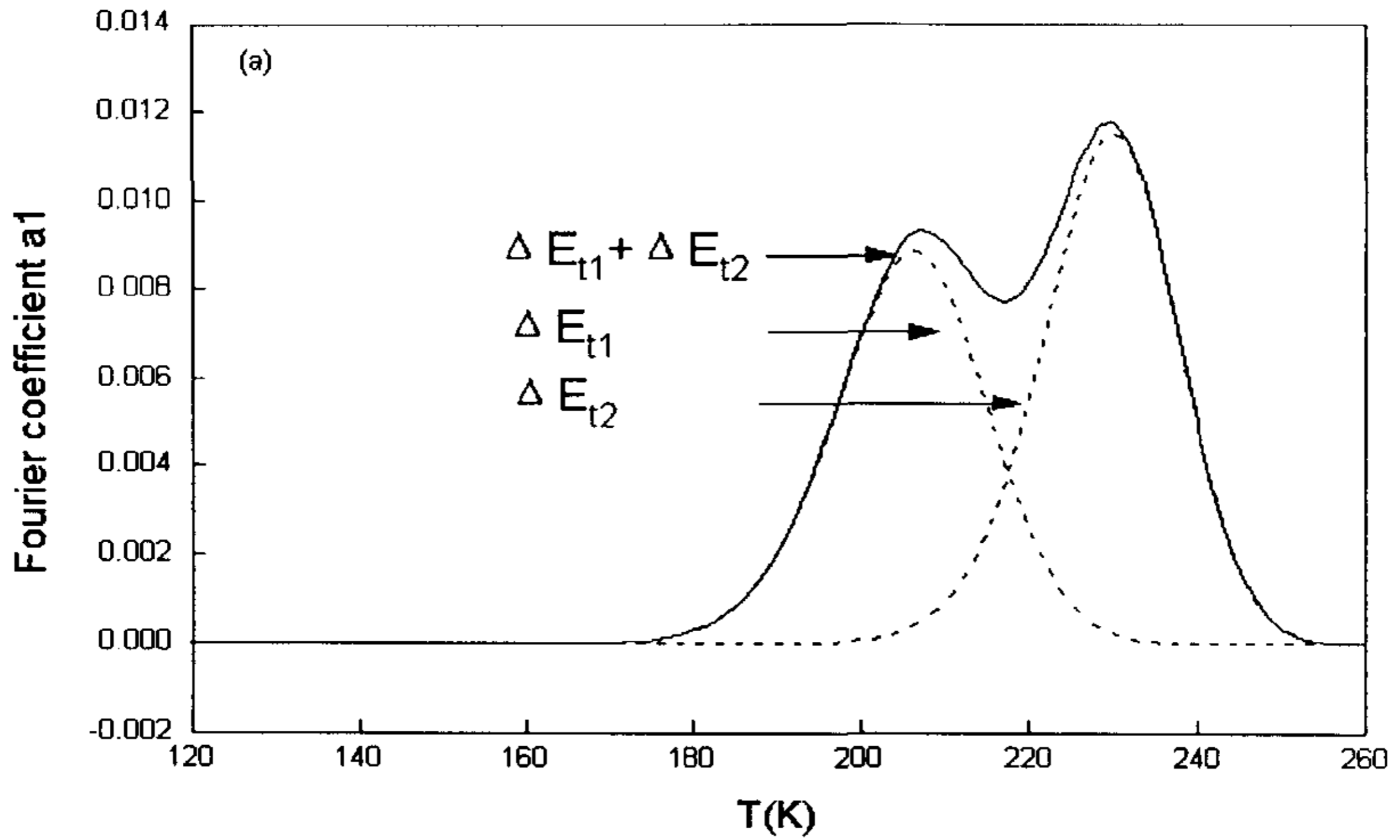


图 1-2 (a) 模拟的双能级傅立叶系数谱图(实线), $\Delta E_{t1} = 0.30 \text{ eV}$ $\sigma_1 = 8 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2}$, $\Delta E_{t2} = 0.43 \text{ eV}$ $\sigma_2 = 8 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-2}$, 解谱后的傅立叶系数谱图 (点线).

1-2 (b) 由双能级傅立叶系数谱计算得到的 Arrhenius 谱图.

1.2.3 用迭代法分解傅立叶系数谱

对于单能级，用 FFT-DLTS 方法进行数据处理时不存在系统误差，因此如果能将双能级傅立叶系数谱分解成单能级傅立叶系数谱则可以消除上述的系统误差，以下介绍如何通过用迭代方法将双能级傅立叶系数谱分解成两个单能级的傅立叶系数谱。

首先从双能级傅立叶系数谱中先确定其中一个能级的初始参数，如深能级的位置 ΔE_1 及俘获截面 σ ，这可由它所对应的 *Arrhenius* 图中的线性区域的斜率和截距计算得到，并由(1-12)式则可以直接得出相应的瞬态电容的衰减幅度 A 。将这三个参数代入(1-1)、(1-2)式，就可以直接模拟出随温度变化的瞬态电容信号，再对该瞬态电容信号进行快速傅立叶变换就可得到该能级模拟的傅立叶系数谱。然后用原双能级傅立叶系数谱减去模拟出的单能级傅立叶系数谱，得到另一能级的傅立叶系数谱。该能级的参数即可以从相减后的傅立叶系数谱中计算得到。再将双能级傅立叶系数谱减去该能级模拟的傅立叶系数谱又得到了第一个能级的谱图，这样可将该过程反复迭代进行下去，直到连续两次迭代的结果之间的差异足够小即收敛为止。在图 1-2(a)中实线是双能级解谱后的图谱，仅经过一次迭代，所导出的能级位置是 $\Delta E_{11} = 0.429 \text{ eV}$ 、 $\Delta E_{12} = 0.303 \text{ eV}$ ，该结果与理想值已基本一致。

如果两个傅立叶系数峰位足够接近，则会合并成一个单峰，如图 1-3 (a) 中曲线 a 所示，图中的两个能级的参数分别是 0.38 eV 和 0.40 eV 。在这样情况下的傅立叶谱图同样可以通过迭代方法进行解谱。该双能级的傅立叶系数谱图 (曲线 a) 的 *Arrhenius* 曲线由图 1-3(b)中曲线 A 所示。可以从曲线 A 的下部分计算出一个能级的有关参数，并模拟得出该能级的傅立叶系数谱如图 1-3 (a) 中曲线 b 所示。另一个能级的能级参数可以从图 1-3 (b) 中的曲线 B 的上半部分计算得到，该曲线是由图 1-3(a)中的曲线 a 减去虚线 b 后所得曲线的 *Arrhenius* 图。模拟得出另外一个能级的傅立叶系数谱图由图 1-3 (a) 中的曲线 c 所示。经过三次迭代，计算得出两能级的结果分别为 0.3766 eV 和 0.4015 eV 与理想值基本一致。用 DLTS 方法或者传统 FFT-DLTS 方法都无法对该情况进行正常的数据处理。因此迭代的 FFT-DLTS 方法(IFFT-DLTS 法)不仅消除了 FFT-DLTS 方法所引入的误差，而且还显著提高了谱的分辨率。

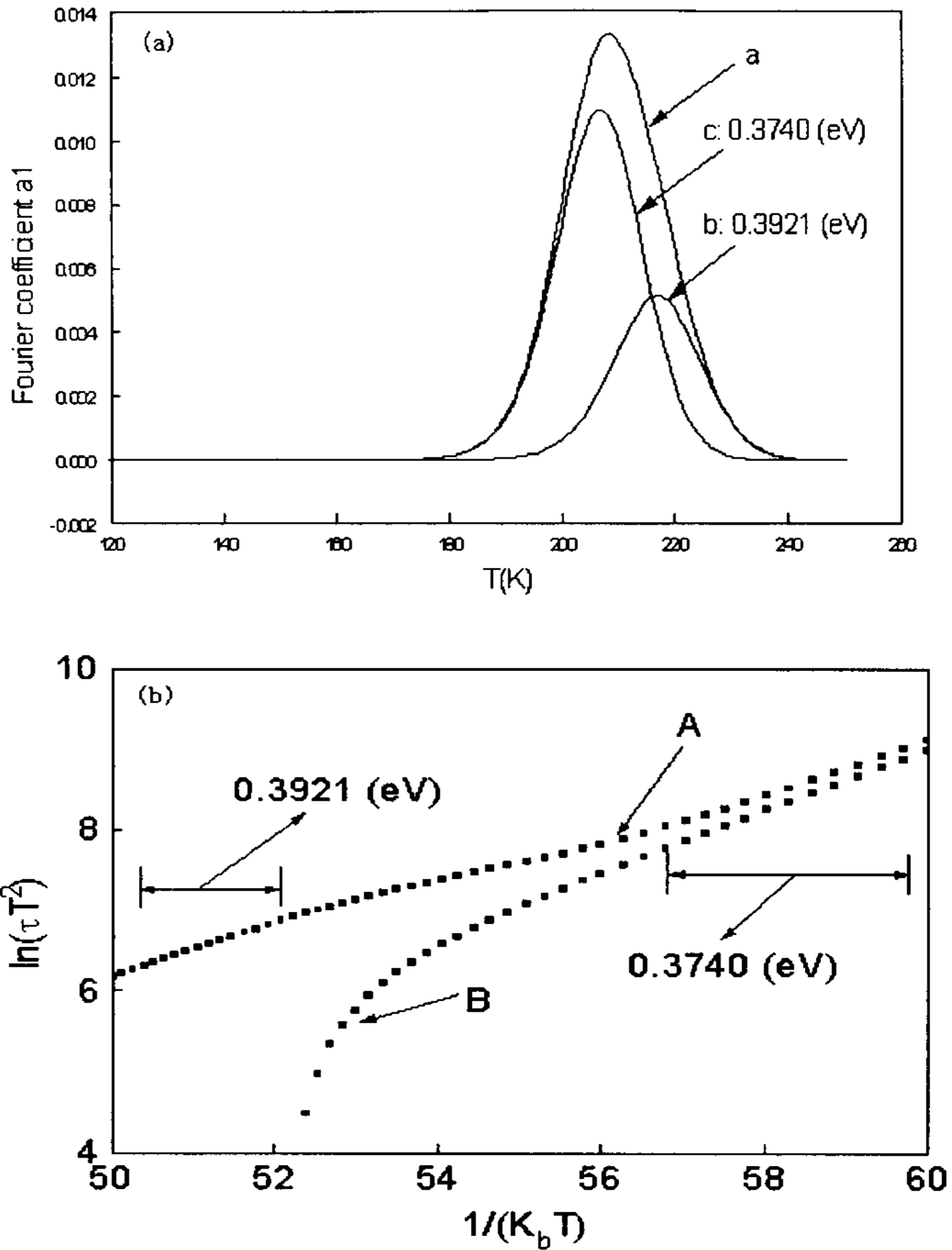
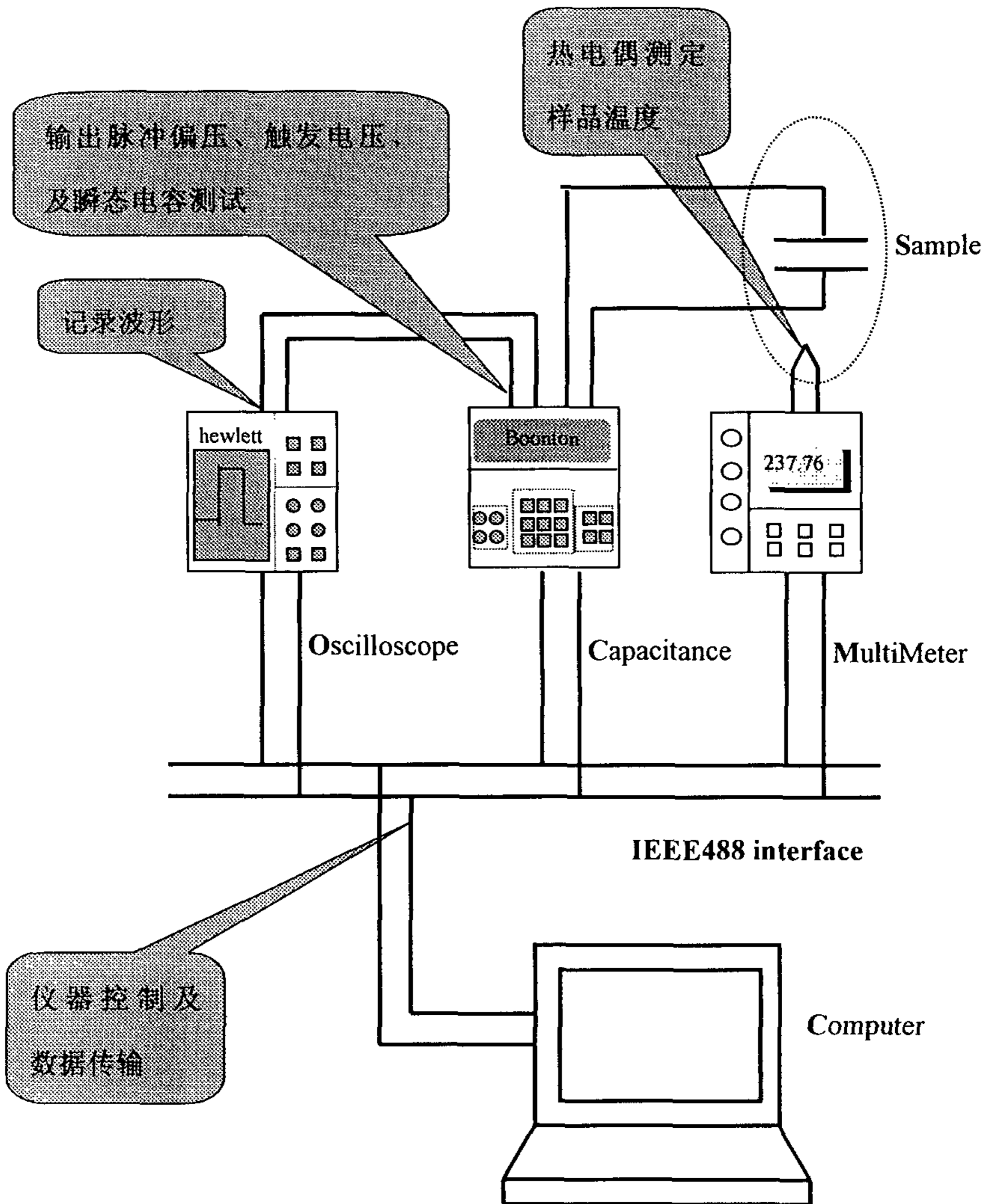


图 1-3(a): 模拟傅立叶系数谱: 曲线 a- 有迭加的双能级谱, $\Delta E_{11} = 0.38 \text{ eV}$, $\Delta E_{12} = 0.40 \text{ eV}$; 曲线 b- 单能级谱, $\Delta E_1 = 0.3740 \text{ eV}$ 由 Arrhenius 谱线 A 下半部分计算得到; 曲线 c- 单能级谱, $\Delta E_1 = 0.3921 \text{ eV}$ 由 Arrhenius 谱线 B 的上半部分线性区域计算得.

图 1-3(b) Arrhenius 谱, A 是由曲线 a 计算得到; B 是由曲线 a 减去曲线 b 后所得曲线计算得到.

1.3 系统构成

1.3.1 系统硬件构成



快速傅立叶变换深能级瞬态谱测试系统

计算机控制的快速傅立叶变换深能级瞬态谱测试系统如上图所示。

A 电容仪：(BOOTON 7200 Capacitance Meter)

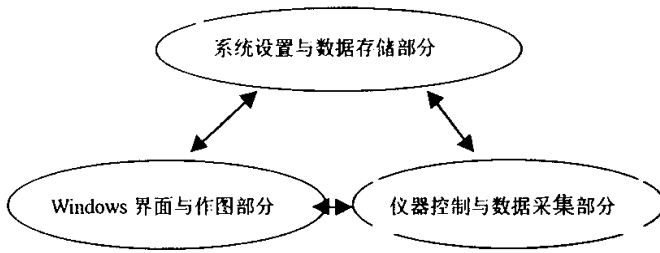
该电容仪的偏压输出有内部偏压输出和外部偏压输出两种模式，利用电容仪的内部偏压输出功能，由计算机控制连续输出两个不同的偏压就可以输出一个脉冲，该脉冲的上升沿或者下降沿的时间约为 0.2ms ，远小于通常测量时的时基 $10 \times 20\text{ms/div}$ ，而且瞬变电容的起始时间可以选取跳变后的某时刻，由脉冲跳变而引起的波形的畸变可以忽略不记。该脉冲的最小宽度约为 95ms ，因此要想得到脉冲宽度更大的脉冲必须在连续输出的不同偏压之间加一个延时程序。该电容仪的内部偏压输出范围是 $[-100\text{V}, 100\text{V}]$ 。如果要获得较小宽度的脉冲电压，则可以使该电容仪外接脉冲发生器，利用电容仪的外部偏压输入端口，将脉冲电压加至样品上，脉冲的宽度与高度可由脉冲发生器来控制。

B 瞬态示波器：(HP 54600-Series Oscilloscopes)

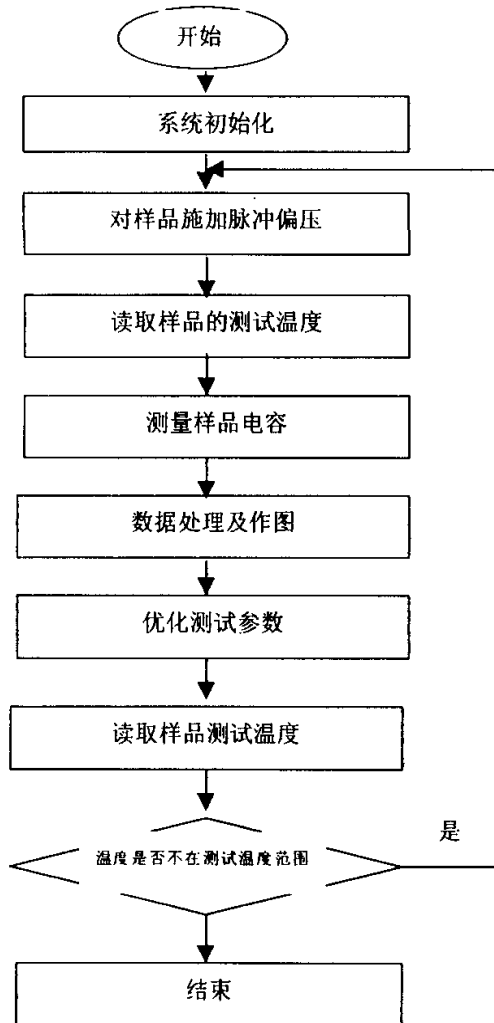
该瞬态示波器用来读取电容仪输出的与瞬态电容成正比的模拟电压信号，并把此模拟电压信号转换成数字信号，然后通过 IEEE488 总线传输给计算机。在测量过程中，随着温度的改变，在相同的偏压下样品的电容值也发生改变，因此要不断的调节示波器的窗口的幅度和偏移，控制程序用整条瞬态电容的平均电容来定示波器显示窗口的偏移，而选取整条瞬态电容的幅度的 1.5 倍来定示波器的显示窗口的幅度。该程序段见附录。

C 测试过程：

首先计算机通过 IEEE488 总线控制电容仪(BOOTON 7200 Capacitance Meter) 输出一个脉冲电压，该脉冲分两路，一路输出给样品，样品两端加上脉冲信号后，其电容是一个瞬态过程，整个过程由电容仪读入并输出一个与电容成正比的电压信号。脉冲另一路输出到瞬态示波器(HP 54600B)，同步外触发瞬态示波器(HP 54600B)读取电容仪输出的电压信号。这一电压信号被示波器记录下来并转换成数值量，然后通过 IEEE488 接口传输到计算机中。记录的电压瞬态信号是以字符串的模式传入到计算机中，在计算机中把该字符串翻译成于瞬态电压



FFT-DLTS 测试系统的软件的三大组成部分



信号一一对应的数字量写入存储数组当中，对该瞬态电压信号做快速傅立叶变换，并把傅立叶系数谱直接显示在计算机屏幕上，便于实时观察与控制。测量结束后，把存储数组以文件形式保存起来，以便做进一步数据处理与分析。

测试过程中，需要不断改变样品的温度，温度所对应的热电偶电压由数字万用表(Fluke 8840)测得。然后把测得的电压值通过 IEEE488 总线传入到计算机当中，再利用相应的转换程序把样品温度计算出来。

1.3.2 系统软件构成

快速傅立叶变换 DLTS 测试系统的软件部分主要由如图所示的三大部分组成。利用 FFT-DLTS 进行能级位置的测试，其流程图如下图所示。

考虑到 Visual Basic 在

界面设计的优越性，该 FFT-DLTS 测试系统是用 VB5 开发出来。该系统所用的 Ieee488 卡是由 HP 公司制造，该卡自带动态连接库软件。端口的输入输出是由 VB 调用动态连接库来完成。部分源程序参见本文附录。

在数据采集过程中由于示波器获得了整个电容瞬态变化曲线，瞬态谱在进入计算机之前由示波器不断求平均以降低噪声，该测试系统以二进制模式存储测试的电容瞬态谱线，所以在数据处理过程中也可以进行常规 DLTS 数据处理。因为测试过程温度扫描速度比较慢，所以可以进行实时的数据处理分析。该测试系统还自带一个由 VB3 开发的数据处理程序，该程序可以对测试的瞬态谱线进行常规 DLTS、FDLTS 或者 FFT-DLTS 数据处理。数据处理程序和系统控制程序构成了系统的软件部分。

在建立测试系统过程中，为了提高系统的分辨率和精度，还必须考虑以下几个方面：

A. 信噪比的提高：

通过不断读入瞬态曲线并求平均，可提高信噪比。但每条曲线有几百个数据点，数据传送至计算机也需要一定的时间，这也就限制了平均次数的增加。而我们利用 HP54600B 瞬态示波器自带对测量信号求平均的功能，在瞬态示波器内直接对输入测量信号求平均，然后再把平均后的信号传输给计算机。这样可大大减少了数据传输的时间，使得在相同时间内，增加了平均次数。而信噪比是与平均次数 $N^{1/2}$ 成正比，增加平均次数可提高信噪比，但随着平均次数的进一步增加，测量时间也随之延长，在 FFT-DLTS 实验中，平均次数 N 一般取 20 为宜。

B. 傅立叶转换：

当瞬态曲线传输至计算机后，即可对其进行傅立叶变化，这可通过快速傅立叶变换的方法，也可通过数值积分计算的方法。通过模拟和比较，快速傅立叶变换方法具有变换速率快和精度比较高的特点，而数值积分的方法比较简单但必须通过耗时来提高转换精度。在通常情况下两种方法都可以使用。但快速傅立叶变换的方法必须要求取样的点数是 2 的 n 次方，而积分方法不受取样点数的限制。当瞬态谱曲线上的取样数据点数不是 2 的 n 次方的时候，则必须用积分的方法进行数据处理。

C. 简化的最小二乘法:

在数据处理分析程序中,用简化最小二乘法对瞬态电容谱进行光滑拟合,该方法在不引入系统误差的情况下光滑测量的瞬态电容谱线,相当大的提高了瞬态谱的信噪比,即提高了测量精度及分辨率。

1.4 实验

实验样品为氢气区熔 n 型硅单晶,用常规扩散工艺制成 p^+nn^+ 二极管样品,经室温电子辐照,电子辐照的能量是 2Mev,辐照剂量为 $1 \times 10^{14} e/cm^2$ 。图 1-4 是该样品的 FFT-DLTS 与 DLTS 谱图,该样品存在着由于电子辐照而产生的 4

C. 简化的最小二乘法:

在数据处理分析程序中,用简化最小二乘法对瞬态电容谱进行光滑拟合,该方法在不引入系统误差的情况下光滑测量的瞬态电容谱线,相当大的提高了瞬态谱的信噪比,即提高了测量精度及分辨率。

1.4 实验

实验样品为氢气区熔 n 型硅单晶,用常规扩散工艺制成 p^+nn^+ 二极管样品,经室温电子辐照,电子辐照的能量是 2Mev,辐照剂量为 $1 \times 10^{14} e/cm^2$ 。图 1-4 是该样品的 FFT-DLTS 与 DLTS 谱图,该样品存在着由于电子辐照而产生的 4 个缺陷深能级,分别记为 E1, E2, E3, E4。表 1-2 列出了经 DLTS、FFT-DLTS 及迭代解谱后的实验结果。

表 1-2 DLTS, FFT-DLTS 和 IFFT-DLTS 方法计算的能级位置 (eV)

能级位置	DLTS	FFT-DLTS	IFFT-DLTS
E ₁	0.168	0.167	
E ₂	0.203	0.214	
E ₃	0.310	0.269	0.294
E ₄	0.419	0.368	0.426

对于 E1 与 E2,由于傅立叶系数峰位分离较大,用 FFT-DLTS 方法进行数据处理可以忽略系统误差,DLTS 方法与 FFT-DLTS 方法所给出的结果在误差范围内基本一致。但是对于 E3 与 E4,由于傅立叶系数峰位比较接近并且已经部分发生迭加,所以存在着较大的系统误差。用 FFT-DLTS 方法所引入误差可以用迭代方法修正。图(1-5)给出了通过迭代法进行解谱后的结果,经过十次迭代后,模拟得出的双能级傅立叶系数(点线)与测试得到的傅立叶系数谱(实线)重合的很好。

从图(1-4)中还可看出,FFT-DLTS 谱图信噪比要明显优于 DLTS 谱图,

这是因为 DLTS 方法是通过取两点的差值,即通过率窗方法,来得出 DLTS 图谱,而 FFT-DLTS 图谱中的傅立叶系数是通过瞬态谱上所有点进行积分计算得出,起到了平滑的作用,因此具有较高的灵敏度。

1.5 总结

用传统 FFT-DLTS 方法在对能级间隔比较近的多能级样品进行数据处理时,不可避免的存在着一定的系统误差,由于多能级的傅立叶系数谱的迭加导致了该系统误差的产生,而且该误差随着傅立叶系数迭加的增大而增大。本文提出了用迭代法把多能级傅立叶系数谱分解成单能级傅立叶系数谱,然后再用传统 FFT-DLTS 方法进行数据处理,该方法不仅消除了该系统误差,而且还显著提高系统的分辨率。

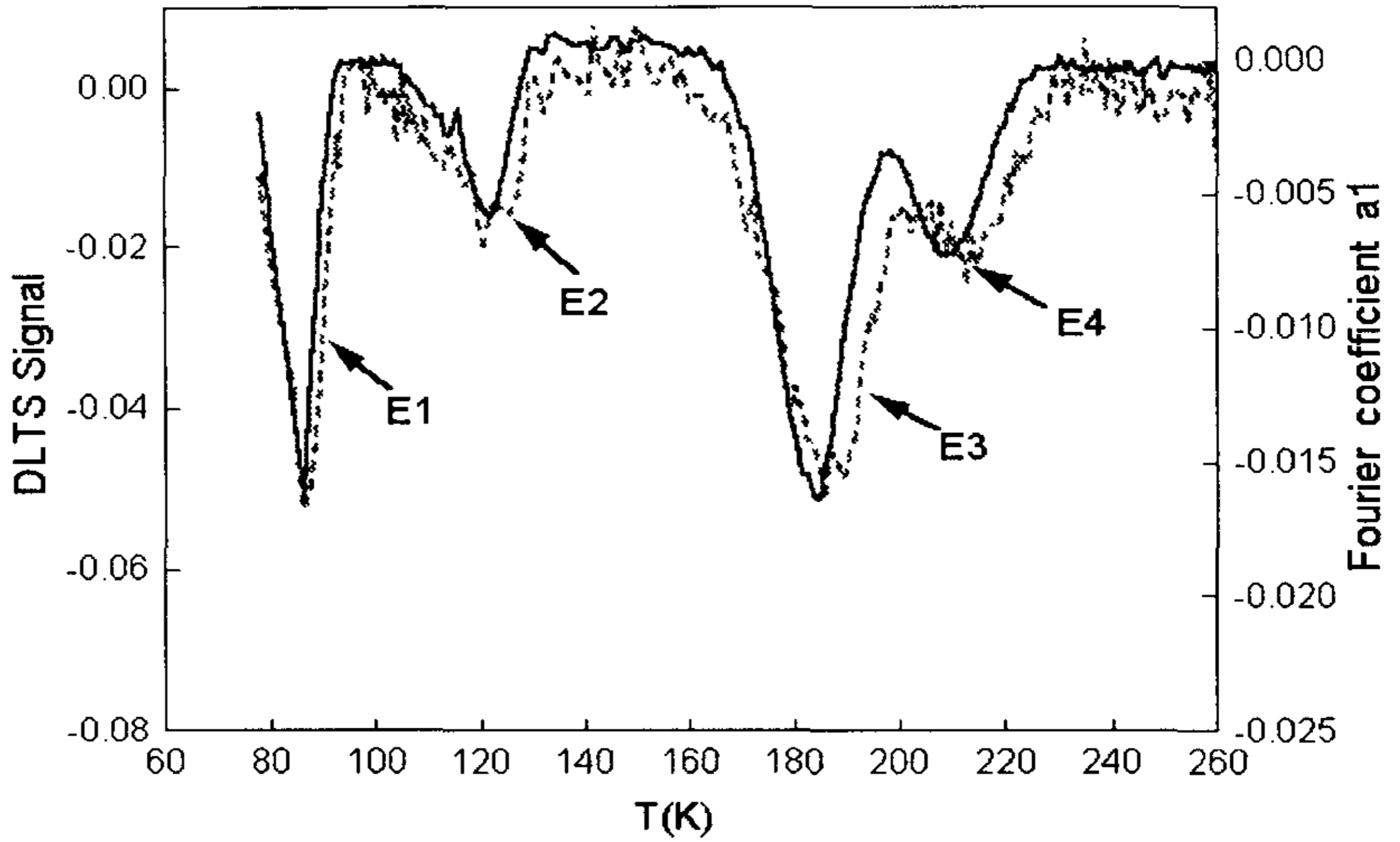


图 1-4: 含有四能级的样品测试结果, 实线: FFT-DLTS 谱
图: 点线: DLTS 谱图

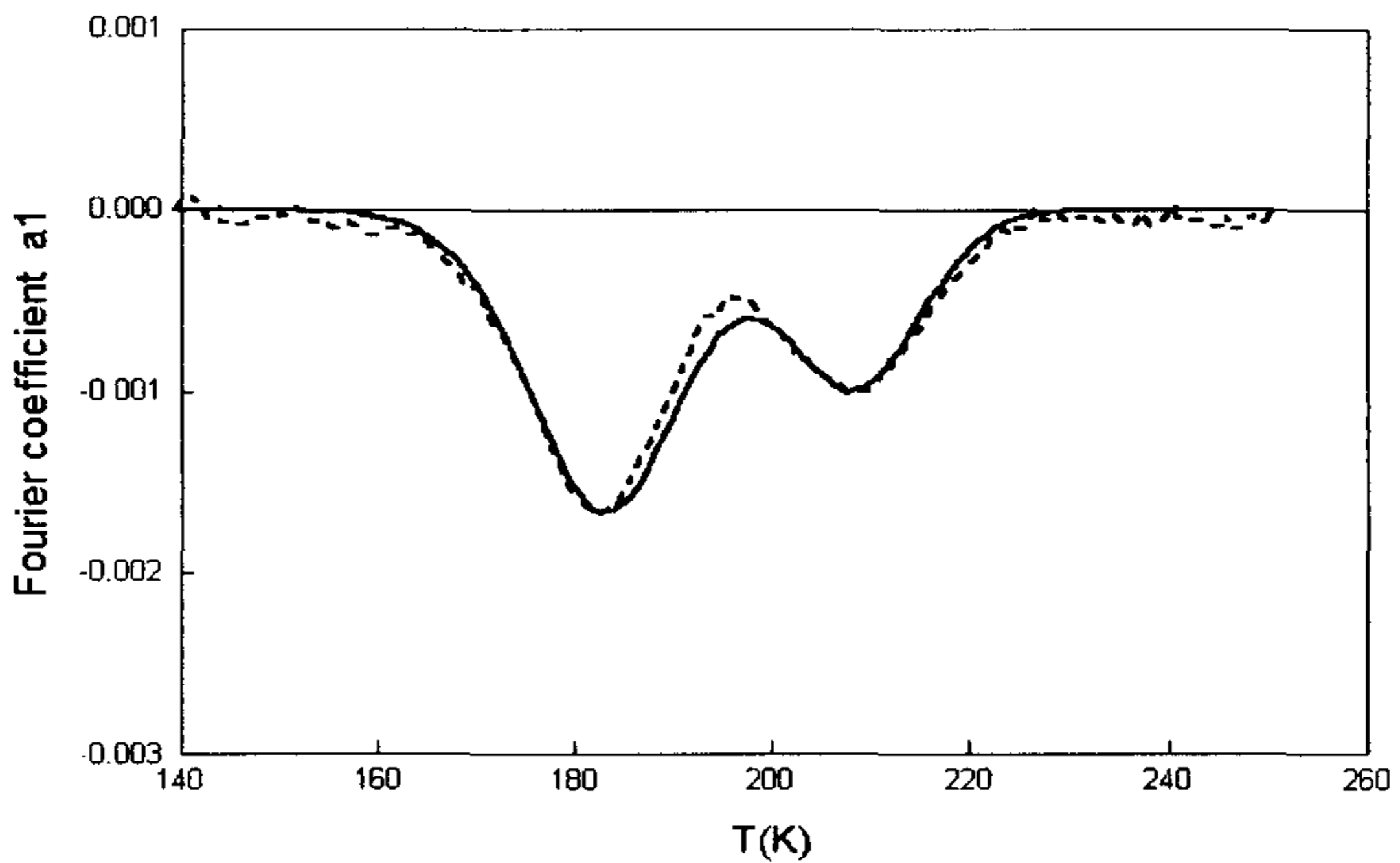


图 1-5: 能级 E_3 和 E_4 的傅立叶系数谱, 点线 --- 实验测试数据的傅立叶系数谱; 实线 --- 模拟数据的傅立叶系数谱.

1.6 参考文献

- [1] D. V. Lang *Deep-level transient spectroscopy: A New method to characterize traps in semiconductors*. 1974 J. Appl. Phys. 45, 3023-3031.
- [2] D. J. As, P. W. Epperlein, and P. M. Mooney. *Deep electron traps in GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As Single-Quantum wells*. 1988 J. Appl. Phys. 64, 2408-2414.
- [3] S. K. Zhang, F. Lu, Z. M. Jiang, J. Qin, and Xun Wang, *Coulomb Charging Effect of Holes in Ge Quantum Dots Studied by Deep Level Transient Spectroscopy* 2000 Thin Solid Films, (to be published).
- [4] Qin-Sheng Zhu, and Isamu Akasaki, *High-resolution DLTS and its application to lattice-mismatch-induced deep levels in InGaP*. 1992 Semicond. Sci. Technol. 7, 1441-1445.
- [5] C. W. Wang, and C. H. Wu, *A Novel Technique of Analyzing multiexponential transients for DLTS spectra*. 1992 Solid State Electron. 35, 1771-1776.
- [6] G. L. Miller, J. V. Ramirez, and D. A. H. Robinson, *A correlation method for semiconductor transient signal measurements*. 1975 J. Appl. Phys. 46, 2638.
- [7] L. Dobaczewski and P. Kaczor, *Laplace transform deep-level transient spectroscopic studies of defects in semiconductors*. 1994 J. Appl. Phys. 76, 194.
- [8] S. Weiss and R. Kassing, *Deep level transient fourier spectroscopy (DLTFS)-A Technique for the analysis of deep level properties*. 1988 Solid State Electron. 31, 1733-1742.
- [9] P.D.Kirchner, W.J.Schaff, G.N.Maracas and L.F.Eastman, *The analysis of exponential and nonexponential transients in deep-level transient spectroscopy*. 1981 J. Appl. Phys. 52, 6462-6470.

第二章：金属硅化物电学性质的研究

2.1 引言

在多种半导体材料中，硅是应用最广泛、最成功的一种。硅器件技术的成功，建立在硅所具有的独特的物理、化学性质的基础上。以大规模甚至超大规模集成电路（VLSI/ULSI）为代表的硅器件技术不仅有赖于性能优良的硅单晶及其外延材料，而且也有赖于具有优异性质的硅基薄膜材料。硅基薄膜材料如氧化硅、氮化硅、多晶硅和金属硅化物对硅微电子技术的迅速发展起了重要作用。这些硅基薄膜与硅材料本身匹配性好，在硅器件中可用于绝缘、隔离、钝化、接触、及互连。随着微电子器件技术向更高集成度、更高速度、更强功能和更高可靠性方向发展，硅基薄膜材料性能和制备技术的研究也在进一步深入。

金属硅化物是品种较多的硅基薄膜材料，它们具有一系列发展微电子和光电子器件技术所需的性质。一些过渡金属硅化物由于具有良好的导电性和高温及化学稳定性，早在 80 年代出就引起了人们的广泛注意^[1, 2]。目前金属硅化物作为欧姆接触、肖特基势垒接触、MOS 器件自对准源漏接触和栅电极及栅极互连薄膜材料，日益广泛应用在各种半导体器件制造中。

金属硅化物的许多性质与金属相似，如低电阻率，高温稳定性，与半导体接触同样可以形成肖特基势垒接触或者欧姆接触。与常用的金属相比，金属硅化物还具有平整的接触面，可以选择性腐蚀，在氧化环境中稳定等优点。但金属硅化物的形成需经高温退火过程，这可能会有游离出的金属原子向硅衬底扩散形成深能级缺陷，当深能级缺陷在硅中达到一定浓度和深度时就可能会影响器件的性能。目前对金属硅化物在硅中引入的深能级缺陷的研究还未见有报道，因此开展这方面的研究工作具有一定的重要意义。本章先简单介绍目前较常用的金属硅化物的特点及其制备条件，对其中一些金属硅化物在硅中引入的深能级缺陷展开深入的研究，研究了这些深能级缺陷与形成金属硅化物金属的材料、退火温度的关系，并结合其它电学特性的测试，给出这些深能级对器件特性的影响。通过我们的研究发现，硅化镍将在硅中引入较高浓度的深能级缺陷，而这些深能级缺陷是 NiSi_2/Si 反向漏电流增大的主要原因。

2.2 金属硅化物的特点

超大规模集成电路（VLSI）的原动力产生于更小的（大的封装密度，从而增加了管芯的复杂性）和更快的器件以及较小的功耗。越来越小的器件的不断进展引起了研制新的低电阻率接触及栅、内引线 and 欧姆接触的金属化方案。常规的 Al（Si）金属化方案有以下局限性：

- （1）铝和硅的共熔点低，一般只能采用低于 500°C 的工艺，而且与栅极的接触是非自对准的。
- （2）互连线的电流密度会随着器件尺寸减小而增加，更容易产生电迁移现象。
- （3）易产生结尖峰或结刺击穿，它是由于退火过程中 Si 向 Al 中溶解及 Al 向 Si 衬底中渗透贯穿所造成的。
- （4）容易氧化，

而金属硅化物能有效的克服这些缺点，其具有以下特点：

- 1) 耐高温，热稳定好性，不易氧化。
- 2) 良好的导电特性。其电阻率在 $20\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以下。

随着 VLSI 技术的发展，电路特性线条逐渐变小，电路的横向和纵向尺寸也不断减小，导致薄层电阻的增大和接触电阻的增大。利用金属硅化物/多晶硅复合栅结构可以使栅极和源漏的互连电阻降低一个数量级左右，可以制作 $0.1\mu\text{m}$ 以下的 CMOS 器件。

- 3) 与硅衬底的接触面界面平整。
- 4) 可用自对准工艺工艺形成。对硅化物可以进行选择性腐蚀，并且在低温时不与 SiO_2 反应，这是硅化物的最大特点。

自对准工艺工艺（Self-Aligned silicide Technology 即 Salicide）已经成为快速 CMOS 器件制备技术的关键组成部分，大规模集成电路中，可以形成了稳定的，低电阻率的接触结构，降低栅极及源漏的互连电阻和接触电阻^[3]，图 2-1 为 Salicide 的流程图，从图中可以看出，在第一步低温退火温度下，金属于半导体材料硅发生互扩散形成金属硅化物，伴随着金属硅化物的形成，金属硅化物与 Si 的界面也形成，因此相对于普通溅射方法形成的界面，该界面接触更加紧密

稳定，而且界面清洁，缺少玷污。而没有与硅反应的金属则可以通过选择性腐蚀技术去除，所以该工艺减少了一步光刻手续，在操作上也相对简单。

Self-aligned silicide Technology (Salicide)

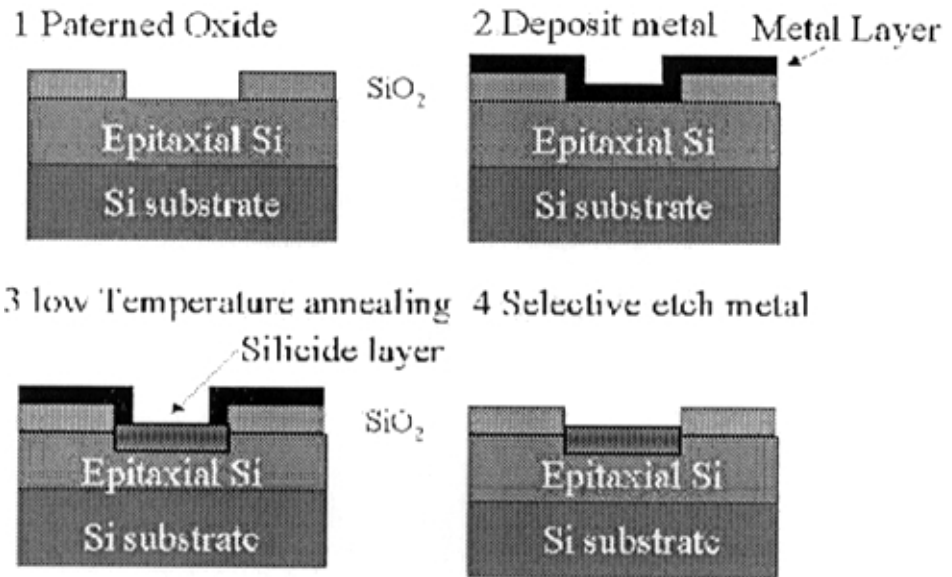


图 2-1：自对准工艺的流程

目前能满足以上条件的金属硅化物有 Ti, Co, Ni, Pd 和 Pt 等金属材料, 可应用于自对准工艺并能与硅形成金属硅化物。这几种硅化物都有各自的优缺点和局限性, 因而有必要对这些硅化物的特性作进一步的研究。

TiSi₂的特点:

Ti 与 Si 反应生成的 TiSi₂ 含有两个相: C49 和 C54 相。

其中 C49 是高阻相, 而 C54 是低阻相。高阻的 C49 相 TiSi₂ 可以在低于 800°C 的较低温度下形成。当退火温度进一步升高时, 可以转换成低阻的 C54 相。实际中应用的是低阻 C54 相 TiSi₂。

当线条宽度降低到 0.3μm 以下之后, 常规 Salicide 工艺形成的 TiSi₂ 薄膜电阻会随着线条宽度的降低而急剧上升^[4]。这是因为线条宽度的减少使 C49-TiSi₂ 向 C54-TiSi₂ 的转变变得困难, 人们采用了一些方法如预非晶化 Si 等来缓解这个矛盾的同时, 也在寻找新型材料替代 TiSi₂。

CoSi₂ 的特点:

- 1) 有低的电阻率, 约 18μΩ-cm^[5]
- 2) 热稳定性好。
- 3) 通过两步退火形成。
- 4) 可以在硅衬底上外延, 与 Si 衬底有平整的界面^[6, 7]。

CoSi₂ 具有电阻率不随线宽减小而改变的优点, 因此在深亚微米和近 0.1μm 器件上将有可能成为自对准硅化物技术的重要材料。

NiSi₂ 的特点:

- 1) 低的电阻率, 约 15~18μΩ-cm。^[5]
- 2) 低的形成温度, 因而可以一步退火形成自对准图形。
- 3) 电阻率不随线宽减小而改变, 也可以在深亚微米和近 0.1μm 器件上将有可能成为自对准硅化物技术的重要材料。

金属硅化物与半导体接触的许多性质与金属相似，同样存在欧姆接触与整流接触，这主要取决于半导体的掺杂浓度，当掺杂浓度很高时，为欧姆接触，反之则成为整流接触，并在半导体一侧形成肖特基势垒。其势垒高度取决于费米能级在两侧的位置，其特性与金半接触完全相同，因此可以采用对金半接触的各种测试方法来研究金属硅化物与半导体的接触特性。

2.3 测试原理

2.3.1 金属硅化物与半导体接触的 C-V 特性

金属硅化物与半导体接触所形成的能带图如图 2-2 (a) 所示

势垒区的电荷和电势分布于单边突变 PN 结完全相似，因此可采用耗尽近似。得到空间电荷区厚度为：

$$x = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (V_D - V)}{eN}}, \quad (2-1)$$

式中的 ε_s 代表半导体的介电常数，N代表半导体的掺杂浓度， V_D 是耗尽区自建势垒高度。对于均匀掺杂半导体，由界面到空间电荷区边缘电场线性下降为零，其中单位面积的势垒电容为：

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN}{2(V_D - V)}}, \quad (2-2)$$

肖特基势垒的电容-电压特性常用来测量半导体的掺杂浓度和肖特基势垒高度，上面关于均匀掺杂半导体的电容-电压关系可改写为：

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN} (V_D - V), \quad (2-3)$$

$1/C^2$ 与 $(V_D - V)$ 呈线性关系，如果由实验测量得到的C和V之间的对应关系，作出 $1/C^2$ 相对于V的曲线，应成直线如图 2-2 (b) 所示。可由曲线的斜率求出掺杂浓度，由曲线与V轴的截距求得半导体的自建势 V_D 。由实验测量的掺杂浓度N可计算费米能级相对导带底的位置 $E_C - E_F$ ，

$$E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N}\right). \quad (2-4)$$

从而根据：

$$\phi_m = eV_D + (E_C - E_F), \quad (2-5)$$

计算出金属硅化物一侧的势垒高度 ϕ_m 。

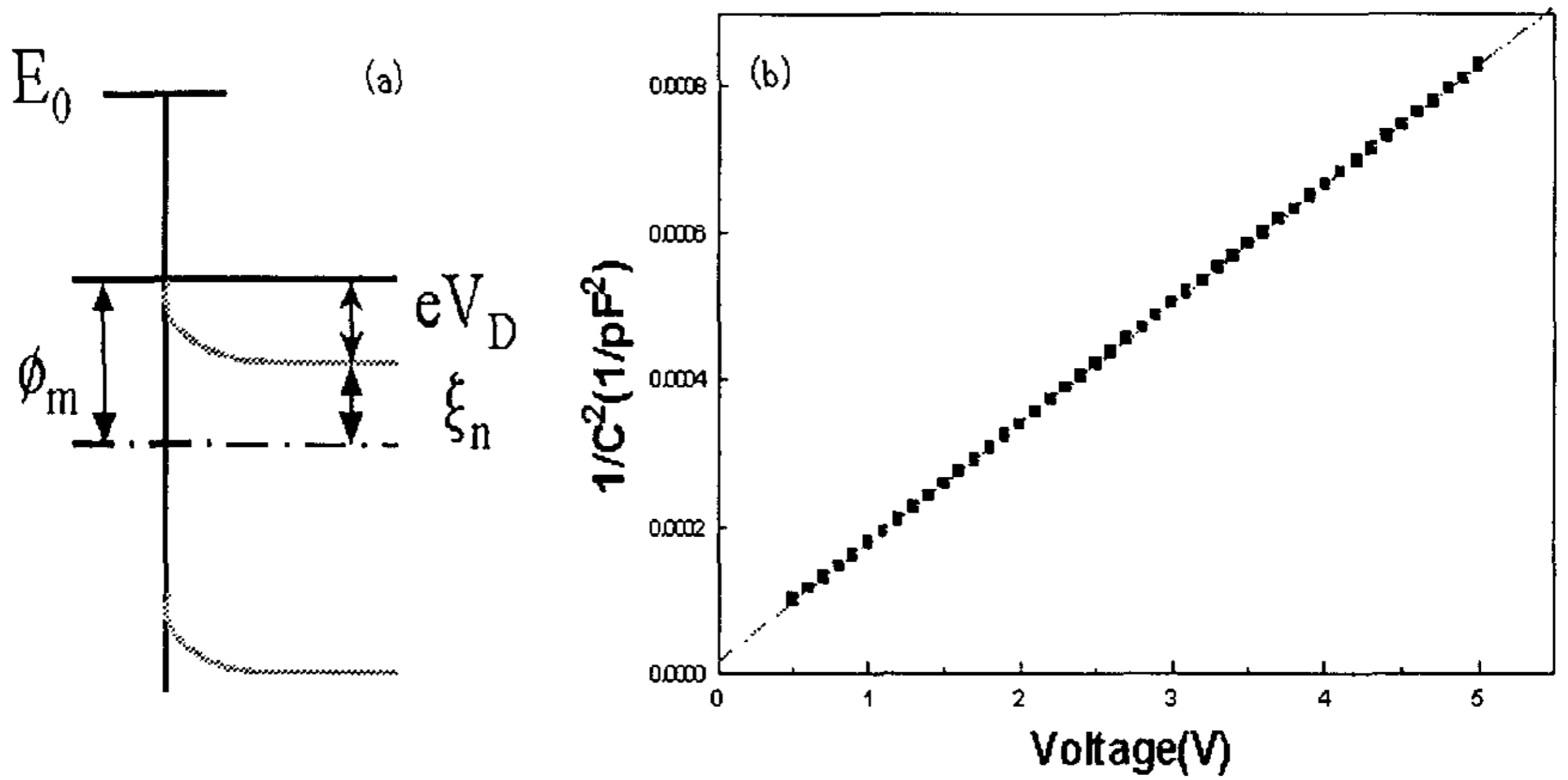


图 2-2 (a): 金属-半导体肖特基接触的能带图，

(b): $1/C^2$ -V 曲线

2.3.2 金属硅化物与半导体接触的 I-V 特性

在外加偏压 V 作用下, 通过金属硅化物与半导体整流接触的电流, 是由越过势垒载流子所构成的。根据热电子发射的理论, 可得通过势垒的电流密度 J 与电压 V 的关系为:

$$J = A * T^2 e^{\frac{\phi_m}{kT}} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) = J_0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (2-6)$$

在加反向偏压时 ($V < 0$), 通过势垒的电流近似为 J_0 , 其大小主要取决于势垒高度 ϕ_m 。若考虑到镜像力效应使势垒高度下降, 反向漏电流为:

$$J_0 = A * T^2 e^{-\frac{\phi_m}{kT}} e^{\frac{\Delta\phi}{kT}} \quad (2-7)$$

其中:

$$\Delta\phi = e \left[\frac{e^3 N_D (V_D - V)}{8\pi^2 \epsilon^3 \epsilon_0^3} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2-8)$$

可见 $\Delta\phi$ 随外加电压而变。在反向时, 随电压增大, $\Delta\phi$ 增大, 也即势垒高度降低, 因而使反向电流随电压上升而略为增大。

由于深能级缺陷在势垒区中形成产生和复合中心, 必须考虑在势垒区中深能级缺陷所引起的反向漏电流。当在肖特基结上加以反向偏压 V_R 时, 结上的势垒高度从 eV_D 上升到 $e(V_D + V_R)$, 因而势垒区中的电场强度将增大, 使载流子的漂移电流超过扩散电流, 于是在结中也有净电流流过。势垒区中间的反向电流是载流子的漂移电流。势垒区宽度 x_m 随反向电压的增大而增大, 所以复合电流 J_r :

$$J_r = -enx_m / 2\tau, \quad (2-9)$$

随反向电压的增加而增大。这时总电流亦不饱和, 而随着反向电压的增加而增大。而复合中心越多即缺陷能级密度越高, 少子寿命 τ 越短, 扩散长度越小。因此势垒复合电流所占比重也越大, 反向电流也越大。

2.3.3 半导体势垒区中深能级缺陷的检测

当降在势垒区中的电压发生变化，势垒区中深能级上的电子分布过渡到平衡或准平衡分布时，伴随着空间电荷密度的变化，从而引起电容的瞬变，由测量这种瞬变过程及其随温度的变化可得到深能级缺陷的浓度、能级位置、俘获截面等参数。

在金属-半导体（肖特基接触）中施加一个电压脉冲，使得禁带中的深能级缺陷填充载流子，在恢复至静置偏压后，深能级中载流子将以一定的发射率 e 发射至导带或价带边，并引起空间电荷区的变化，势垒电容也会以相同的变化规律发生变化。在不同温度下测量这一瞬变过程，可以得到不同温度下载流子的发射率。缺陷上的载流子的发射率 e 与温度 T 满足以下关系：

$$e = T^2 \alpha_0 e^{-\frac{E_t}{kT}} \quad (2-10)$$

式中的 α_0 是于温度无关的常数， E_t 是缺陷上载流子发射的激活能，它是缺陷能级离导带（电子发射）或价带（空穴发射）边距离。由上式可见，可由 $\ln(e/T^2) \sim 1/kT$ 直线关系的斜率来确定缺陷能级位置。

FFT-DLTS 能灵敏地检测半导体中的深能级缺陷，其测试灵敏度与样品的衬底掺杂浓度有关，一般情况下，该系统所能检测出的深能级缺陷的浓度为衬底掺杂浓度的千分之一左右。

2.4 样品的制备

样品采用 n 型 Si(100)低掺杂衬底片，电阻率为 5~8 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。硅片在装入溅射台之前，经过严格的化学清洗，具体清洗过程如下：

- 1) $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2(3:1)$ ，煮沸 15 分钟
- 2) 1 号液 $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}(5:2:1)$ 或稀释的一号液 $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}(50:2:1)$ ，煮沸 10 分钟
- 3) 2 号液 $\text{HCL} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}(8:2:1)$ ，煮沸 10 分钟
- 4) $\text{HF}(1:40)$ 漂 30~60 秒，去除硅片表面天然氧化层

以上每道工序之后用去离子水冲洗 10 分钟。样品经甩干之后装入 OXFORD 多功能溅射台。

溅射台的本底真空低于 7×10^{-7} 托，溅射时通入 4ml/分钟的氩气，使真空保持在 5×10^{-5} Torr 左右。溅射方式采用离子束溅射。溅射束流控制在 65mA 左右。在 Si(100)硅片上连续淀积 Co、Ni、Co/Ni、Ni/Si 薄膜。金属的淀积速率为 0.5 埃/秒左右，溅射金属膜的厚度通过振荡器测量监控。

为研究多层薄膜与硅的固相反应形成硅化物，样品放入卤素灯光快速热退火系统中，在高纯 N_2 气保护下进行退火。 N_2 流量为 2 升/分钟。退火温度范围为 $350^\circ\text{C} \sim 1050^\circ\text{C}$ 。

金属溅射在开有不同大小的氧化层窗口硅片上，经退火后形成硅化物，通过选择腐蚀去除氧化层上未反应的金属，形成自对准的金属硅化物肖特基。

实验中所用到的样品如表 2-1 所示：

表 2-1：测试样品总表

生长结构	硅化物	晶向	退火温度	退火时间
Co(50nm)/Si	CoSi_2	100	$600^\circ\text{C}/850^\circ\text{C}$	60(s)/60(s)
Ni(15nm)/Si	NiSi_2	100	$500^\circ\text{C}/850^\circ\text{C}$	60(s)/60(s)
Pt (9nm) /Si	PtSi	100	550°C	60(s)
Pt(9nm)/Si	PtSi	100	600°C	60(s)
Co(10nm)/Ni(10nm)/Si	(CoNi)Si	100	$350^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$	60(s)

样品背面采用离子束溅射 Ti 和 Pt，经过 400°C 下一分钟退火形成欧姆接触。

2.5 实验结果与讨论

2.5.1 CoSi_2/Si 与 NiSi_2/Si 的 I-V 特性

样品 CoSi_2 与 NiSi_2 是在相同的硅衬底上以自对准工艺，在相同生长条件下制备而成，并经过 850°C ，1 分钟快速退火；图 2-3 显示了这两个样品在反向偏压下的 I-V 特性，从图中可以看出 NiSi_2 的反向漏电流 ($\sim 10^{-3} \text{A}/\text{mm}^2$) 明显大于 CoSi_2 的反向漏电流 ($\sim 10^{-6} \text{A}/\text{mm}^2$)，根据前面的讨论可知，决定反向漏电流大

小的主要因数，一是肖特基势垒高度，另一个是势垒区中由深能级缺陷引起的产生电流。通过下面的研究，将会给出 NiSi₂/Si 反向漏电流大的原因。

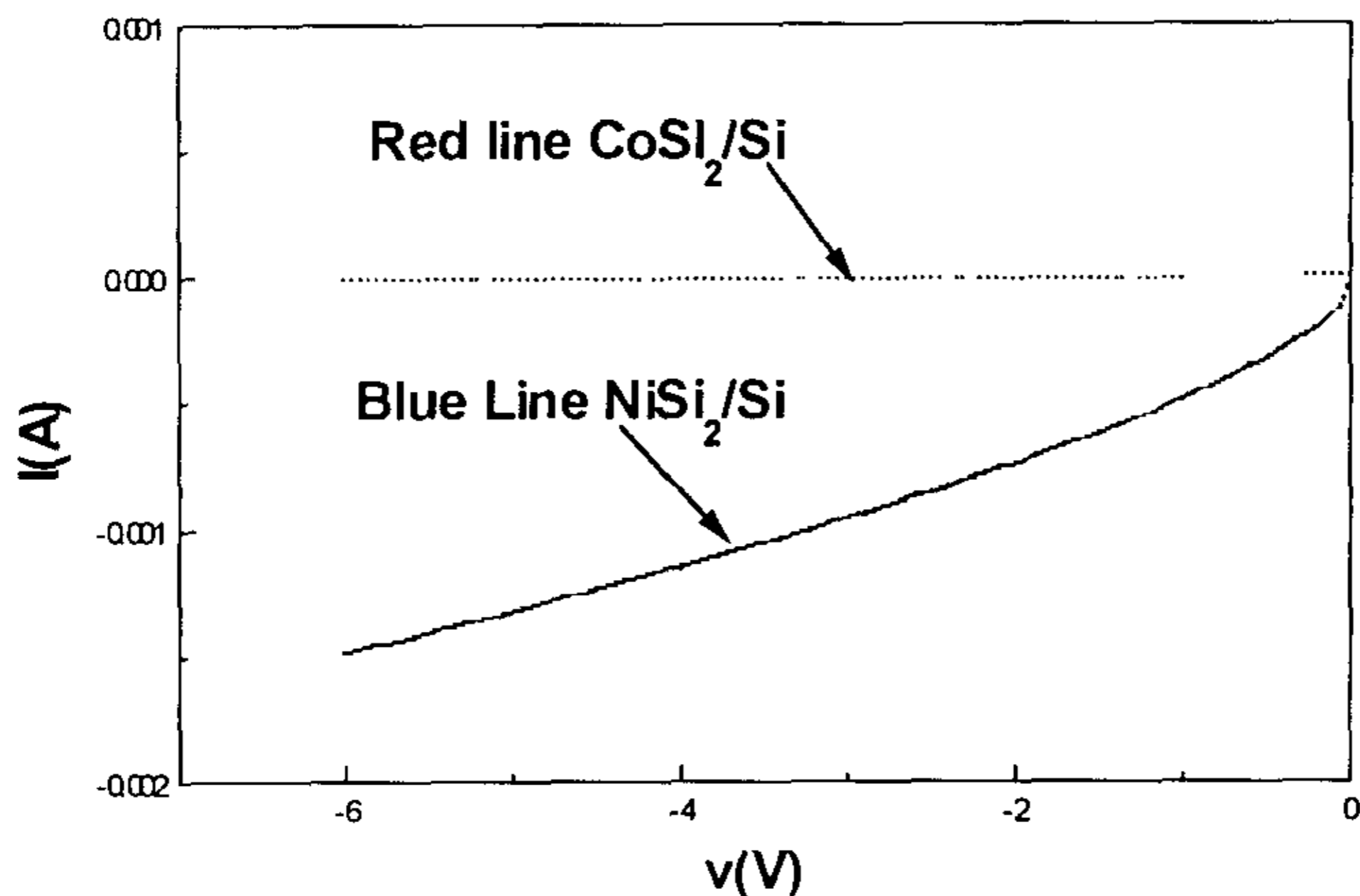


图 2-3: 样品 NiSi₂/Si 与 CoSi₂/Si 的反向 I-V 曲线

2.5.2 CoSi₂/Si 与 NiSi₂/Si 的 C-V 特性

这两个样品的 C-V 测试结果如图 2-4(a)所示，由 1/C²-V 曲线图 2-4 (b) 可分别计算出这两个样品的半导体的掺杂浓度 N_D、费米能级位置 $\xi_n = E_c - E_f$ 、内建势垒高度 V_D 以及金属硅化物一侧的势垒高度 ϕ_m 。计算结果如下表 2-2 所示：

表 2-2: C-V 测试结果

	N _D (/cm ³)	EV _D (eV)	ξ_n (eV)	ϕ_n (eV)
NiSi ₂	6.7×10 ¹⁴	0.38	0.23	0.61
CoSi ₂	5.9×10 ¹⁴	0.29	0.24	0.53

通过计算可得 NiSi₂/Si 与 CoSi₂/Si 的势垒高度 ϕ_m 分别为 0.61eV 和 0.53eV，即 NiSi₂/Si 的势垒高度大于 CoSi₂/Si 的势垒高度，由 2-5 式可得，势垒高度 ϕ_m 越大，反向漏电流越小，显然势垒高度不是导致 NiSi₂/Si 反向漏电流大的原因。

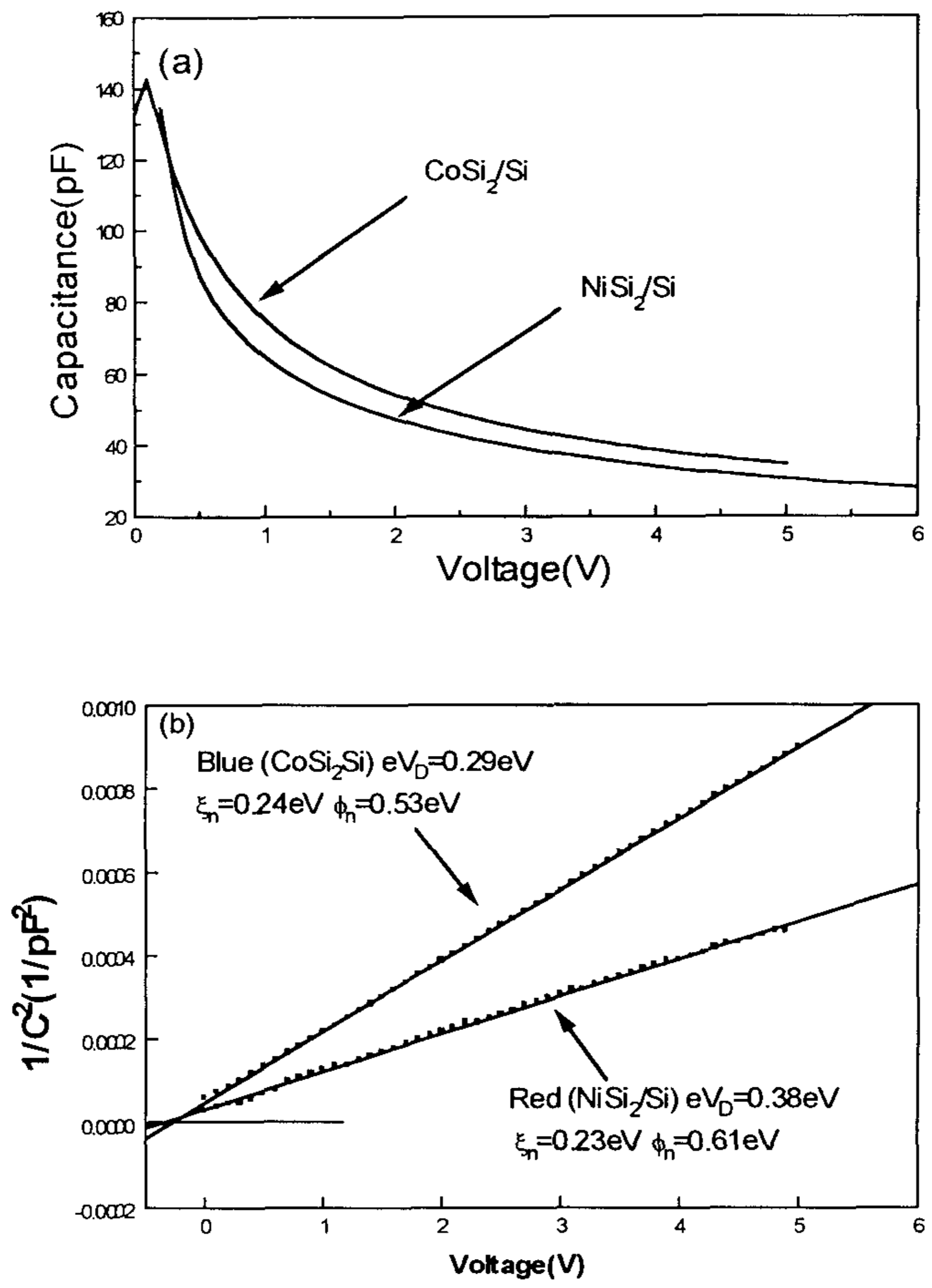


图 2-4 (a): 样品 NiSi_2/Si 与 CoSi_2/Si 的 C-V 测试曲线
 (b): $1/C^2$ -V 曲线

2.5.3 势垒高度随退火温度的变化

对于在不同温度下退火的 Co(10nm)/Ni(10nm)/Si 图形片结构样品进行了 C-V, G-V 测试, 同时根据 C-V 曲线计算了样品 Co(10nm)/Ni(10nm)/Si 结构经过 350°C~600°C 退火后形成的肖特基结的肖特基势垒高度, 肖特基势垒高度如下表 2-3 所示:

表 2-3: C-V 测试结果总表

350°C	$C_0(\text{pF})$	549	400°C	$C_0(\text{pF})$	820
	$N_D(\text{cm}^{-3})$	1.39E15		$N_D(\text{cm}^{-3})$	7.73E14
	$EV_D(\text{eV})$	0.347		$eV_D(\text{eV})$	0.326
	$\xi_n(\text{eV})$	0.258		$\xi_n(\text{eV})$	0.274
	$\phi_n(\text{eV})$	0.605		$\phi_n(\text{eV})$	0.600
450°C	$C_0(\text{pF})$	1113	500°C	$C_0(\text{pF})$	378
	$N_D(\text{cm}^{-3})$	7.73E14		$N_D(\text{cm}^{-3})$	4.45E14
	$EV_D(\text{eV})$	0.422		$eV_D(\text{eV})$	0.234
	$\xi_n(\text{eV})$	0.274		$\xi_n(\text{eV})$	0.287
	$\phi_n(\text{eV})$	0.695		$\phi_n(\text{eV})$	0.521
550°C	$C_0(\text{pF})$	743	600°C	$C_0(\text{pF})$	631
	$N_D(\text{cm}^{-3})$	6.62E14		$N_D(\text{cm}^{-3})$	4.62E14
	$EV_D(\text{eV})$	0.361		$EV_D(\text{eV})$	0.347
	$\xi_n(\text{eV})$	0.277		$\xi_n(\text{eV})$	0.286
	$\phi_n(\text{eV})$	0.638		$\phi_n(\text{eV})$	0.633

从势垒高度的计算结果, 可以发现当退火温度较低时, 即 350°C~400°C, 势垒高度稳定在 0.60eV 附近。当退火温度进一步升高 (450°C~500°C), 势垒高度略有变化。而当退火温度达到 550°C 与 600°C 之间时, 势垒高度稳定在 0.63eV~0.64eV 之间。这些变化正好对应 Co/Ni/Si 结构进行快速退火随退火温度的相变。通过这一实验可以得知, 金属硅化物所形成的势垒高度随退火温度变化不大。

2.5.4 用 FFT-DLTS 检测金属硅化物在硅中引入的缺陷

在自对准工艺条件下，金属硅化物在制备过程中有可能在硅中引入的深能级缺陷，这通常会出现在以下几个过程。在溅射过程中，具有一定能量的金属原子溅射到半导体表面而产生深能级缺陷；为了要形成硅化物，需要进行第二步退火，在退火过程中，溅射的金属原子有可能向半导体内部扩散而引入深能级缺陷；当采用快速退火时，高温的淬火效应有可能在硅衬底中形成热缺陷^[9]。由金属原子杂质扩散而产生的深能级缺陷与高温退火而产生的热缺陷的主要区别在于，热缺陷在衬底中均匀分布，而金属原子扩散形成的缺陷，会在衬底硅中随着深度的增加而衰减。

A. 低温退火退火条件下的缺陷研究：

自对准工艺生长 PtSi/Si 样品，其退火温度为 600°C，快速退火时间为 1 分钟。该样品的 FFT-DLTS 谱图如图 2-5 所示。在 FFT-DLTS 测试系统的测量灵敏度范围内，没有探测到任何深能级缺陷。这表明了在此自对准工艺条件下，在溅射金属过程中不会因为金属原子的溅射到半导体表面上而在半导体中引入深能级缺陷。

自对准工艺生长 (CoNi)Si/Si 样品，退火温度为退火温度为 600°C，快速退火时间为 1 分钟，该样品的 FFT-DLTS 谱图如图 2-6 所示，同样在该测试系统的测量分辨率范围内，没有探测到任何深能级缺陷，这说明在低温退火条件下，既不会因为溅射在衬底硅中形成深能级缺陷，同样不会因为 Ni 和 Co 的扩散形成，在半导体衬底 Si 中形成杂质深能级缺陷。这就说明在后面将提到的 CoSi₂/Si 与 NiSi₂/Si 中深能级缺陷的产生的原因于低温退火和溅射工艺无关。

通常一步低温退火形成的金属硅化物，只存在高阻相，要想得到低阻相的金属硅化物，还必须进行第二步高温退火。

B. 高温退火条件下的缺陷的研究

在相同的生长工艺条件下，在半导体衬底硅生长 CoSi₂ 与 NiSi₂，形成肖特基势垒接触，第二步退火温度均为 850°C，退火时间为 1 分钟。在相同反向脉冲偏压及相同的测试条件下进行 FFT-DLTS 测试，CoSi₂/Si 与 NiSi₂/Si 的 FFT-

DLTS 谱图如图 2-7 所示, 其中样品 NiSi_2/Si 存在两个深能级缺陷分别记为 E_1 和 E_2 , CoSi_2/Si 只存在一个深能级缺陷, 记为 E_1 。其能级位置和俘获截面见表 2-4。

表 2-4: 样品 CoSi_2/Si 与 NiSi_2/Si 的 FFT-DLTS 测试结果

样品	E1		E2	
	$\Delta E(\text{eV})$	$\sigma(1/\text{cm}^2)$	$\Delta E(\text{eV})$	$\sigma(1/\text{cm}^2)$
CoSi_2/Si	0.22	$3.8\text{E}-13$	无	无
NiSi_2/Si	0.20	$1.1\text{E}-13$	0.39	$2.0\text{E}-11$

NiSi_2/Si 与 CoSi_2/Si 的 E_1 能级傅立叶系数谱的峰位基本重合, 而且在计算误差范围内由 Arrhenius 图计算得出的深能级的位置浓度也基本相同(深能级位置约为 0.20eV 、浓度约为衬底掺杂浓度千分之一量级)。在高温退火条件下, 退火温度大于 800°C , 在 $(\text{NiCo})\text{Si}_2/\text{Si}$ 样品中同样探测到了该深能级缺陷, 因此可以断定该深能级不是由于在高温退火条件下 Ni 或 Co 扩散进入衬底硅而形成的深能级缺陷, 而是由于在第二步高温退火在半导体 Si 中产生的热缺陷, 根据文献报道当快速退火大于 850°C 时就有可能在硅中引入深能级缺陷^[9], 其中一个缺陷就与我们所检测到的 E_1 缺陷相类似。

样品 NiSi_2/Si 中的深能级缺陷 E_2 很有可能是由于在高温退火条件下, Ni 原子扩散到半导体 Si 中形成的杂质缺陷能级。由于 Ni 在硅中是深能级杂质, 其两个深能级位置分别处于导带底之下 0.35eV 和价带顶之上 0.23eV 处^[8]。实验测得到的能级 E_2 镍的第一个能级相一致。正是由于在 NiSi_2/Si 样品中存在着深能级缺陷, 在半导体中形成复合中心, 导致样品 NiSi_2/Si 存在着比较大的反向漏电流。相比较而言, 在 CoSi_2/Si 样品中, 并没有检测到 Co 的缺陷能级。在高温下, Ni 原子的扩散速度非常快, 而 Co 的扩散速度相对比较慢, 两者的自扩散系数相差非常大。晶体的自扩散系数方程为: $D=D_0\exp(-E_A/kT)$, 表 2-5 列出了硅中 Ni, Co 等金属的自扩散系数。

表 2-5: 硅中 Ni, Co 等金属的扩散系数

	$D_0(\text{cm}^2/\text{sec})$	$E_A(\text{eV})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})(850^\circ\text{C})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})(600^\circ\text{C})$
Ni	0.002	0.47	1.6×10^{-5}	3.8×10^{-6}
Co	9.2×10^{-4}	2.8	2.5×10^{-16}	6.3×10^{-20}

两者要相差 11 个数量级，Ni 在高温下扩散速度远远大于 Co 的扩散速度，由此测试系统的测量灵敏度范围内根本无法探测到深能级杂质 Co。

C. 缺陷的浓度

当瞬态衰减电容 ΔC 远小于耗尽区的结电容 C ，并且半导体 Si 是体均匀掺杂的时候，深能级缺陷的浓度满足下关系式：

$$N_T \cong 2N_D \frac{\Delta C}{C}, \quad (2-11)$$

其中 N_T 是耗尽区中缺陷浓度， N_D 为半导体掺杂浓度。实际测量时均选取脉冲偏压高度为 1 伏特，例如脉冲偏压为[-5V, -4V]、[-4V, -3V] 所以必须要加一个修正项 $\Delta D_0/\Delta D$ ，其中 ΔD_0 为 $D(V)-D(0)$ ， $D(V)$ 是偏压为 V 时的耗尽区的深度， ΔD 为脉冲偏压所扫过的势垒区的深度，修正过的缺陷浓度分布方程式如下：

$$N_T \cong 2N_D^+ \frac{\Delta C}{C} \frac{\Delta D_0}{\Delta D}, \quad (2-12)$$

利用 2-12 式，通过计算可得到深能级杂质缺陷 Ni 在深度为[1.5 μ m,2.3 μ m] 的衬底硅中的平均浓度，约为： $3.76 \times 10^{14} \times 1.05/142 = 2.78 \times 10^{12} (1/\text{cm}^3)$ ，即约为衬底掺杂浓度的 1%，通常深能级杂质浓度约为 1% 掺杂浓度的情况下会有比较大的反向漏电流的。

2.6 结论

金属硅化物 NiSi₂/Si 存在比较大的反向漏电流，而相同条件下生长的 CoSi₂/Si 有很好的反向特性。自对准工艺中，溅射金属过程不会在半导体中形成深能级缺陷，而且在低温退火条件下，亦不会形成深能级缺陷。

在 850 °C 高温退火条件下，在 CoSi₂/Si 和 NiSi₂/Si 样品中都会形成热缺陷，由于 Ni 的扩散系数比较高，在高温快速退火条件下，Ni 原子就会扩散到半导体 Si 中，形成浓度比较高的 Ni 杂质深能级缺陷，该深能级缺陷是导致 NiSi₂/Si 反向漏电流大的主要原因。

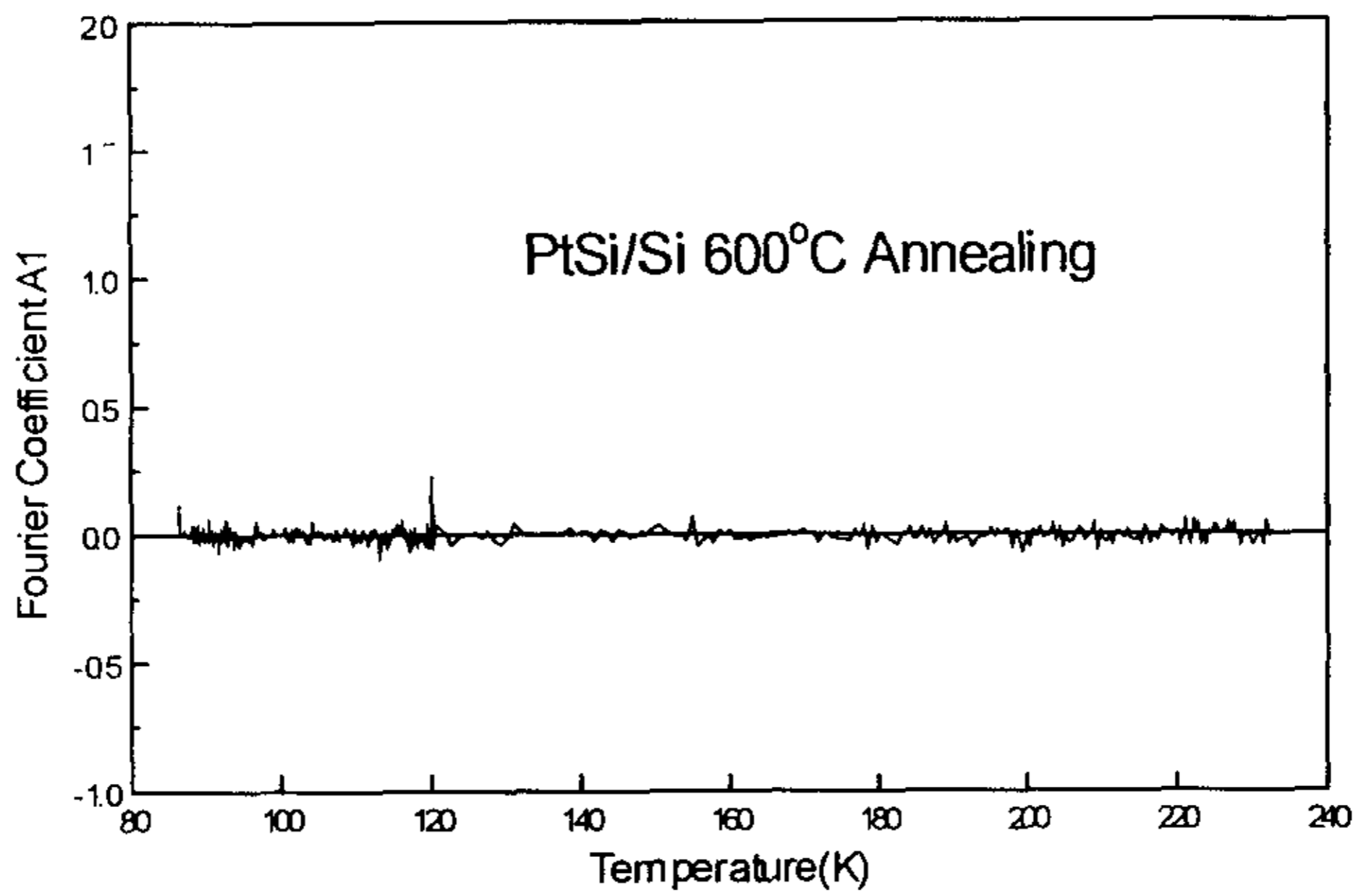


图 2-5: 样品 PtSi/Si 的傅立叶系数谱图

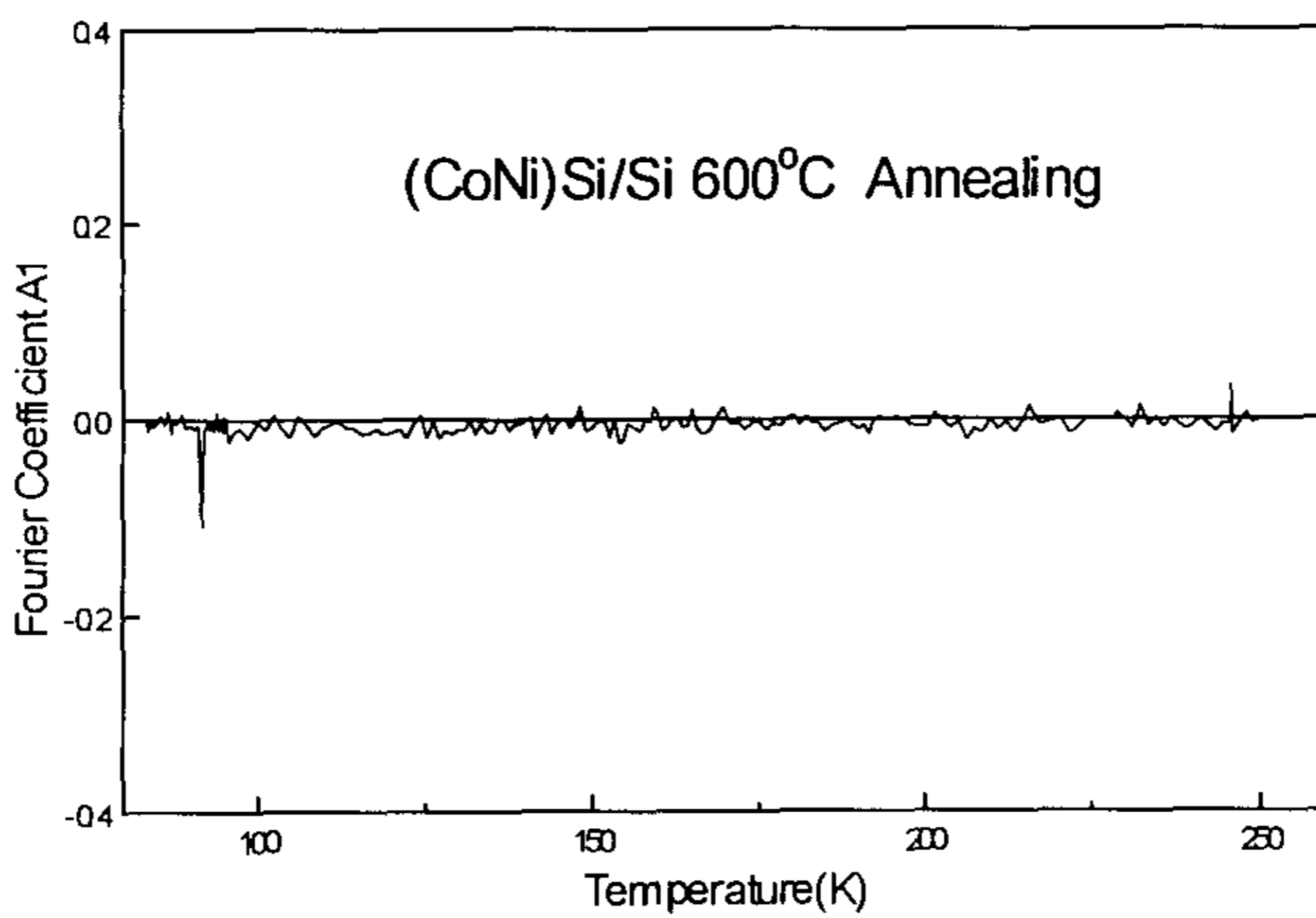


图 2-6: 样品 (CoNi)Si/Si 的傅立叶系数谱图

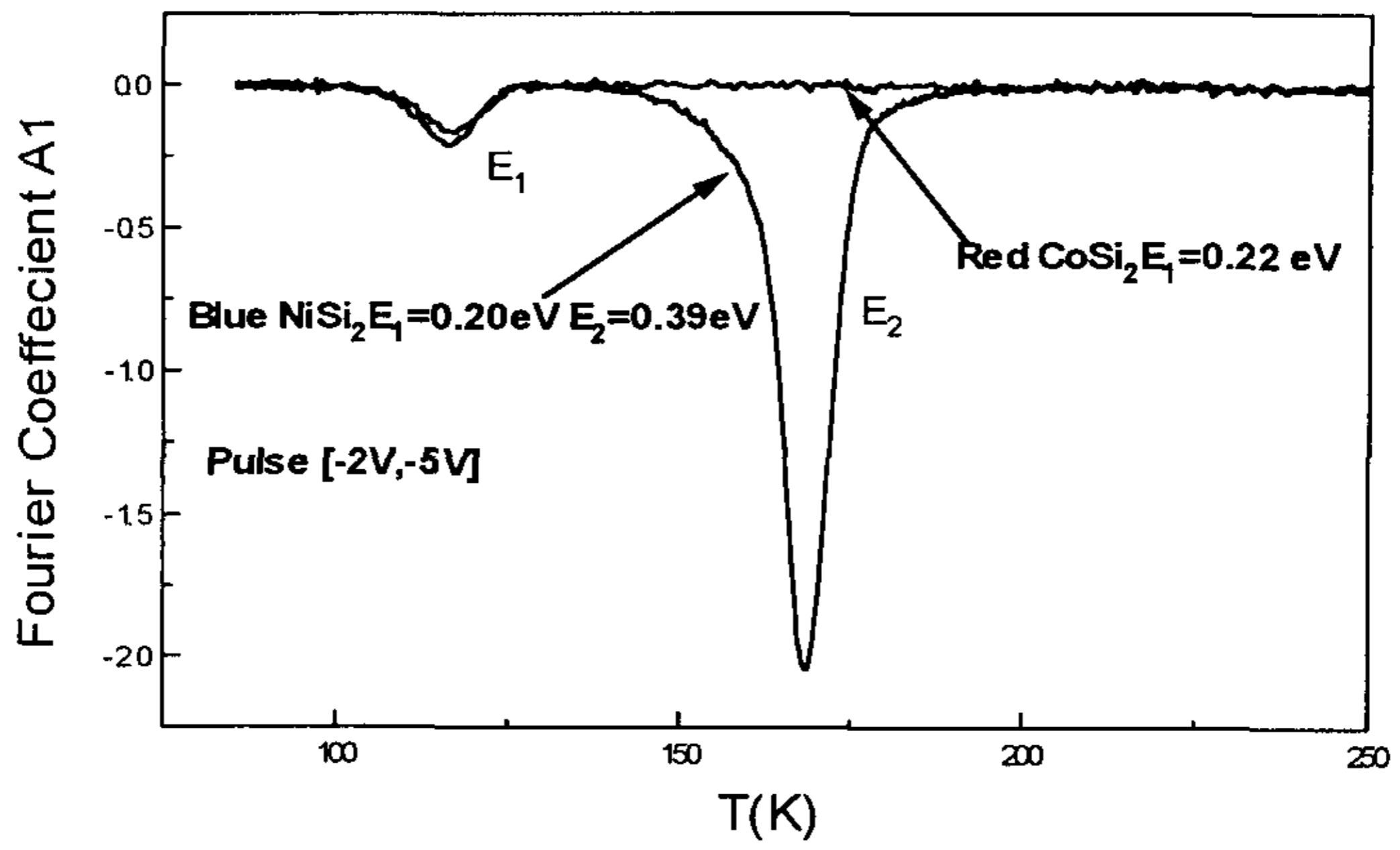


图 2-7: 样品 NiSi₂/Si 与 CoSi₂/Si 的傅立叶系数谱图

2.7 参考文献

- [1] S.P.Murarka, *Silicides for VLSI Applications*, New York,:Academic, 1983.
- [2] Marc-A. Nicolet, S. S. Lau, *In VLSI Electronics*, Microstructure Science V6, edited by N. G. Einspruch, G. B. Larrabee, New York: Academic Precess, 329~464 (1983)
- [3] Jorge A.kittl, Wei-Tsun Shiau, Donald Miles, *Salicides and alternative technologies for future Ics*, Solid State Technology, P.81-92,June 1999
- [4] J. B. Lasky, J. S. Nakos, O. J. Cain, and P. J. Geiss, *Comparison of Transformation to Low Resistivity Phase and Agglomeration of $TiSi_2$ and $CoSi_2$* ,IEEE Trans. Electron Devices, Vol.38, P.262-269, 1991
- [5] Karen Maex and Marc van Rossum, *Properties of Metal Silicide*, INSPEC, 1995, P.191P. I. Shah、IEEE Tranns Electron. Dev. ED26 632 (1979)
- [6] M. L. A. Dass, D. B. Franser and C. S. Wei, *Growth of epitaxial $CoSi_2$ on (100) Si*, Appl. Phys. Lett.,58, (1991), P.1308-1310
- [7] K. R. Das and D-X Xu, 1996 VMIC Conference, P560
- [8] A.G. Milnes, 半导体深能级杂质, 科学出版社, 1985
- [9] Fang Lu,Feng Lu and Henghui Sun, *Electrically active defects in n-type silicon induced by rapid thermal annealing*, Semicond. Sci. Technol , 7 (1992),P918-922

致 谢

在这三年的学习和科学研究中，我的导师陆昉教授严谨的治学态度，孜孜不倦的教诲，和勤奋的工作和学习作风都给我留下了深刻的印象，对我今后的工作学习将有很大的影响，令我受益非浅。陆老师同时也非常关心我的生活，理想和人生观，使我在做人方面也有很大长进。能够得到陆昉教授的指导，是一件非常幸运和值得骄傲的事情。为此，我衷心地对陆昉教授表示深深的感谢

王讯院士也曾经不辞辛劳的在百忙之中抽出时间来为我修改文章，王讯院士认真、仔细的工作作风，给了我深刻的启发。邓震波老师也曾手把手的教过我作实验，从他身上我也学到很多知识。

感谢微电子实验室的李柄宗教授与莫鸿翔同学为我提够了测试的样品，及一些受益非浅的讨论。感谢本实验室的张胜坤、熊卫华、扬榆宁、陈宇、高琦、蒋玉龙同学的帮助，与他们在一起生活、学习的几年，将是美好的回忆。

附录一 FFT-DLTS 测试软件维护文档

概述:

FFT-DLTS 测试软件是 DLTS 测试系统重要组成部分, 用于控制该系统测试硬件协调工作, 该测试软件分硬件控制程序部分和数据处理程序部分组成。其中控制程序是在 VB5.0 的环境下编译开发, 主要由三大模块组成, 分别是: 系统硬件初始化模块、DLTS 测试模块、数据存储模块, 通常在整个测试过程中, 以上三个模块顺序完成各自的工作。数据处理程序是在 Vb3.0 环境下编译开发, 它包括 FFT-DLTS、DLTS、FDLTS 三种独立的数据处理方法, 可以选取其中任意一种方法进行数据处理, 也可以多种方法进行比较研究。

1 重要变量说明

在文件 fftdlts5.bas 中主要是一些重要变量或常量的说明语句, 现将一些重要的常量进行说明。

Global Const dimension = 512

Global Const wavepoints = 1000

Dimension 是指读取示波器两时间指针间的取样点数, wavepoints 表明示波器整个时间范围内的取样点数, 而这一数值必须根据示波器的说明书来确定。因为该程序调用的 FFT 的动态连接库中的 FFT 函数必须要求取样点数为 2 的整数次方, 因此 dimension 的最佳取值为 $\text{dimension} = \text{Int}(\log(\text{wavepoints}) / \text{Log}(2))$ 。

Global Const wavebuffer = 4 * wavepoints + 800

因为程序设置示波器以 ASCII 码模式输入数据。所以必须要有足够的缓冲区。该缓冲区的大小必须大于 $4 * \text{wavepoints}$ ，该常量设置了该缓冲区的大小。

```
Type recordofwave
    t As Single
    tw As Single
    vrange As Single
    offset As Single
    wave(dimension) As Integer
End Type
```

为了方便瞬态波形数据的存储，定义了 Recordofwave 类型，一个完整瞬态谱可以用该类型中的全部变量来替代。t 用来存储瞬态谱线的当前温度，tw 用来存储瞬态谱的时间跨度即瞬态谱的周期，vrange 存储示波器的电压幅度，offset 存储示波器的电压偏移。Wave(dimension)存储了瞬态谱中的每个点在示波器屏幕中的位置。瞬态谱中每个点的电压值为： $(\text{Wave}(i)-128)/256 * \text{vrange} + \text{offset}$ 。

```
Global recordlty(1000) As recordofwave
```

随温度变化的瞬态谱由 recordlty 数组来存储。

2 重要程序段说明

2.1 示波器波形读取

示波器的波形读取功能由 readwave(), oscStrToInt()函数来完成。函数 readwave()的功能是读入把示波器中表征瞬态数据的字符串，并存储在字符串数组中。该函数同时也读入了示波器的电压偏移和电压幅度设置。分别保存在 Vrang 于 Offset 变量中，以便于后面的

计算。

```
Sub readwave()  
    Dim i As Integer  
    Static s As String  
    Dim timebase As String  
  
    timebase = String(80, 0)  
    status = viWrite(addscope, ":channell:range?", 16, actual)  
    status = viRead(addscope, timebase, 80, actual)  
    vrange = Val(timebase)  
  
    timebase = String(80, 0)  
    status = viWrite(addscope, ":channell:offset?", 17, actual)  
    status = viRead(addscope, timebase, 80, actual)  
    offset = Val(timebase)  
  
    s = String(wavebuffer, 0)  
    status = viWrite(addscope, ":waveform:data?", 15, actual)  
    status = viRead(addscope, s, wavebuffer, actual)  
    If status < VI_SUCCESS Then  
        MsgBox "Can not read waveform data from the oscilloscope!",  
48, "WARNING"  
        End  
    Else  
        datahavebeenread = True  
    End If  
    i = oscStrToInt(s)  
  
    For i = 1 To wavepoints  
        If wave(i) < 0 Then wave(i) = wave(i) + 256  
    Next  
  
End Sub
```

在波形字符串进入字符串变量 s 后，函数 oscStrToInt(s)的功能就是将波形字符串进行分割，得到一个整形的数组。

```
Function oscStrToInt(waveString As String) As Integer  
    Dim i, j, pstart, pstop, p0, p1 As Integer  
    Dim max As Integer
```

```

Dim min As Integer
max = 0
min = 255
pstart = 10
p0 = pstart
For i = 1 To wavepoints
    j = i
    p1 = InStr(p0 + 1, waveString, ",")

    If p1 = 0 Then
        If j > 1 Then wave(j) = wave(j - 1)
    Else
        wave(j) = Val(Mid$(waveString, p0 + 1, p1 - p0 - 1))
        If wave(j) <= 0 And j > 1 Then wave(j) = wave(j - 1)
        p0 = p1
    End If
Next i
oscStrToInt = wave(1)
End Function

```

波形经过上述转换后被保存在整形数组 `wave()` 中，然后在和瞬态谱的当前温度，瞬态谱的周期，示波器电压偏移及示波器的电压幅度设置一起保存在 `recordlty` 数组中。

2.2 温度的读取

在测试中，温度的读取是由数字万用表来完成，在该测试程序中单独用 `gettemperature` 函数和 `voltotemp` 函数来完成读取温度操作。如果因测试条件限制，改换了其它型号的数字万用表，则只需要修改 `gettemperatur` 函数就可以使程序正常工作。

2.3 DLTS 测试程序段

在主板上 FFT-T 按钮具有控制电子测试仪器协调工作进行 DLTS 测试的功能。其程序代码如下：

```
Private Sub comdofft_Click()
```

```

Dim i As Integer, j As Integer
Dim strh As String, strl As String, s As String
Dim trilevel As Single, vtemp As Single
Dim stept As Single, endt As Single
Dim t1 As Single, t2 As Single, sum As Single
Dim count As Integer, n As Integer, k As Integer
Dim sign As Integer, actual As Long
Dim strtemp As String, strlen As Integer
ReDim fr(dimension) As Double, fi(dimension) As Double
Dim vrangetemp As Single
Dim averagenumber As Integer

```

```

averagenumber = Val(Text1.Text)
comdofft.Enabled = False
comstop.Enabled = True
comsave.Enabled = False
comexit.Enabled = False
comsetup.Enabled = False
SaveWave.Enabled = False

```

```

endfftdlts = False

```

```

Picture1.Cls
i = drawgrid(255, wavepoints)
s = String(80, 0)
'initial trigger level of oscilloscope
strh = txthighv.Text: strl = txtlowv.Text
trilevel = (Val(strh) + Val(strl)) / 2
strtemp = ":trigger:level " + Str$(trilevel)
strlen = Len(strtemp)
status = viWrite(addscope, strtemp, strlen, actual)
If Val(strh) > Val(strl) Then
    status = viWrite(addscope, ":trigger:slope neg", 18, actual)
Else
    status = viWrite(addscope, ":trigger:slope pos", 18, actual)
End If
n = startnum

```

```

stept = Val(txtstep.Text) 'initial the step temperature
endtemp2 = endtemp1
endt = Val(txtend.Text) 'initial the end temperature

```

```

endtemp1 = endt

t1 = gettemperature()
starttemp = t1
txtcurrent.Text = Str$(starttemp)
sign = Sgn(endt - starttemp)
j = scannum
Do

    count = 0
    Do
        extinpulse strh, strl
        delay timerange
        t2 = gettemperature()
        txtcurrent.Text = Str$(t2)
        count = count + 1
        Loop While (t2 - t1) * sign < stept And endfftdlts = False And
count <= averagenumber
        readwave
        drawwave
        sum = 0
        vmax = value(wave(n)): vmin = value(wave(n))
        For i = 1 To dimension
            k = startnum + i
            vtemp = value(wave(k))
            sum = sum + vtemp
            If vtemp > vmax Then vmax = vtemp
            If vtemp < vmin Then vmin = vtemp
            recordlty(j).wave(i) = wave(k)
        Next

        vtemp = 0.2 * vrange
        vrangetemp = 3 * (vmax - vmin)
        If Abs(vrangetemp - vrange) >= vtemp And vrangetemp >
0.04 Then
            vrange = vrangetemp
            strtemp = ":channell:range " + Str(vrange): strlen =
Len(strtemp)
            status = viWrite(addscope, strtemp, strlen, actual)

            offset = sum / dimension

```

```

        strtemp = ":channell:offset " + Str(offset): strlen =
Len(strtemp)
        status = viWrite(addscope, strtemp, strlen, actual)
        delay timerange
        'Exit Do
    Else

        'If Abs(vmax - offset) >= vtemp Or Abs(vmin - offset) >=
vtemp Then
            offset = sum / dimension
            strtemp = ":channell:offset " + Str(offset): strlen =
Len(strtemp)
            status = viWrite(addscope, strtemp, strlen, actual)
            delay timerange
        End If

        j = j + 1
        recordlty(j).t = (t1 + t2) / 2
        recordlty(j).tw = timerange * dimension / wavepoints
        recordlty(j).vrange = vrange: recordlty(j).offset = offset
        recordfac(j).a1 = ffactor(1, j, 0)
        recordfac(j).a2 = ffactor(2, j, 0)
        recordfac(j).b1 = ffactor(1, j, 1)
        recordfac(j).b2 = ffactor(2, j, 1)

        drawfactor (j)
        t1 = gettemperature()
        Loop While Abs(t1 - starttemp) < Abs(endt - starttemp) And
endfftdlts = False
        endnum = j
        Beep
        If Abs(t1 - starttemp) >= Abs(endt - starttemp) Then
            restart = True
            scannum = 0
        Else
            restart = False
            scannum = j
        End If

        comdofft.Enabled = True
        comstop.Enabled = False

```

```

comsave.Enabled = True
comexit.Enabled = True
comsetup.Enabled = True
SaveWave.Enabled = True

```

End Sub

该程序段是该程控软件的主要部分。在测试过程中采用了示波器的取样平均技术等。测试过程可以由计算机独立完成，这样节约了测试者的工作时间。

2.4 数据存盘程序段

主面板上 savewave 按钮具有存储整套随时间变化的瞬态谱的功能。

```

Private Sub SaveWave_Click()
    Dim datafile As String
    Dim i As Integer
    Dim starttime As Single
    Dim endtemp As Single
    dlgsaveas.DefaultExt = "wav"
    dlgsaveas.Filter = "Data file (*.wav)|*.wav|Any types (*.*)|*.*"
    dlgsaveas.Action = 2
    datafile = dlgsaveas.filename
    endtemp = recordlty(endnum).t
    starttime = tstart
    If datafile <> "" Then
        Open datafile For Binary Access Write As #2
        Put #2, , endnum
        Put #2, , starttime
        Put #2, , endtemp

        For i = 1 To endnum
            Put #2, , recordlty(i)
        Next i
        Close #2
        wavehavebeensaved = True
    End If

```

End Sub

数据是以二进制文件形式存储在磁盘中。为了满足顺利读取该数据文件及画图的需要，该数据文件初始存储了瞬态谱的条数（endnum 变量），瞬态谱线的起始时间（starttime 变量）和瞬态谱的终止温度（endtemp 变量）。在这之后，该数据文件顺序存储了测量得到的深能级瞬态谱。

一条瞬态谱线有 $\text{dimension}=512$ 个点，因为波形上的点是以整形量存储，所以一条波形要站用 $2*\text{dimensionByte}=1\text{KB}$ 磁盘空间，如果整套随温度变化的波形有 350 条谱线，则整套波形存储文件就大约有 350KB 大小。有了存储最原始的瞬态波形的文件，就可以在实验测试完毕后进行各种各样的数据处理。如 FFT-DLTS 数据处理、率窗方法的 DLTS 的数据处理。

附录二 FFT-DLTS 控制软件的使用说明

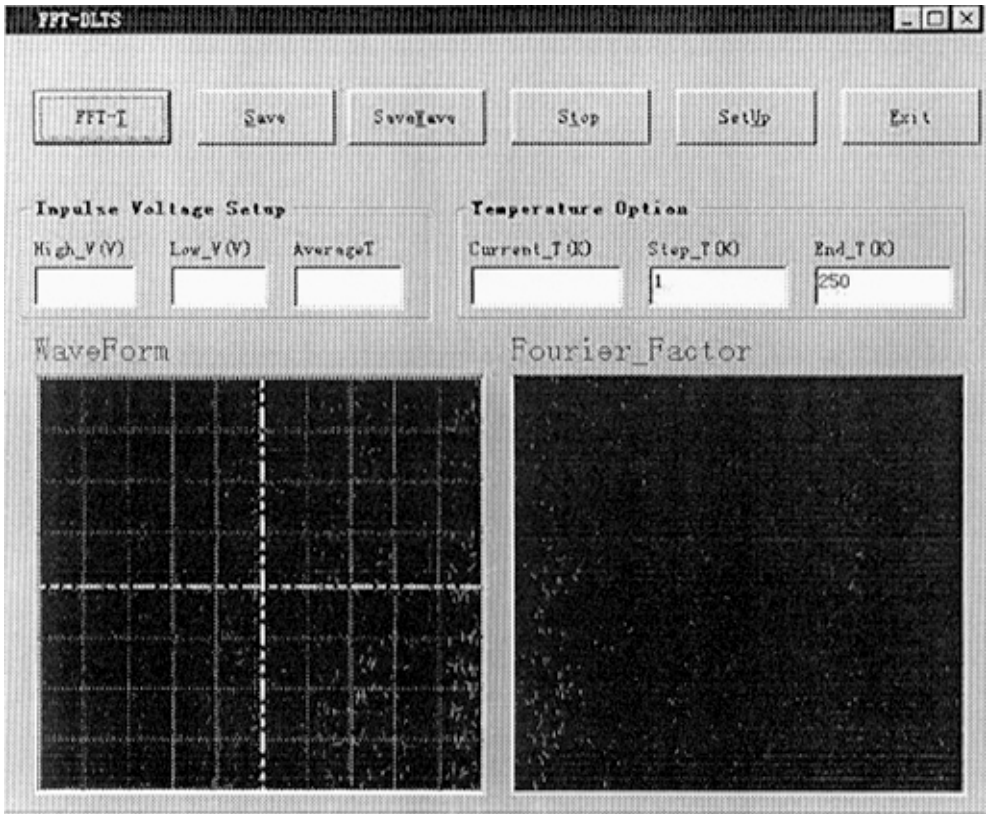


图 1: FFT-DLTS 测试面板

在运行该程序之前必须打开测试所需要的所有电子仪器，选取适当的反向脉冲偏压，并由电容仪的偏压输出给样品，调节电容仪到合适的测量量程，通常选取 $[-20\text{pF}, +20\text{pF}]$ ，如果所需的电子仪器都打开，程序自检成功，不然则会报出错误信息。下面对该测试面板中的各部件进行说明：

Setup 按钮：在进行正常测试之前必须打开该按钮，对示波器进行初始化。按下该按钮将会弹出下面的对话框：在 HighVoltage 与 LowVoltage 文本框里面分别键入正向的脉冲偏压与反向脉冲偏压。按下 Readwave 按钮读取示波器中的瞬态谱线。按下 BestRange 按钮

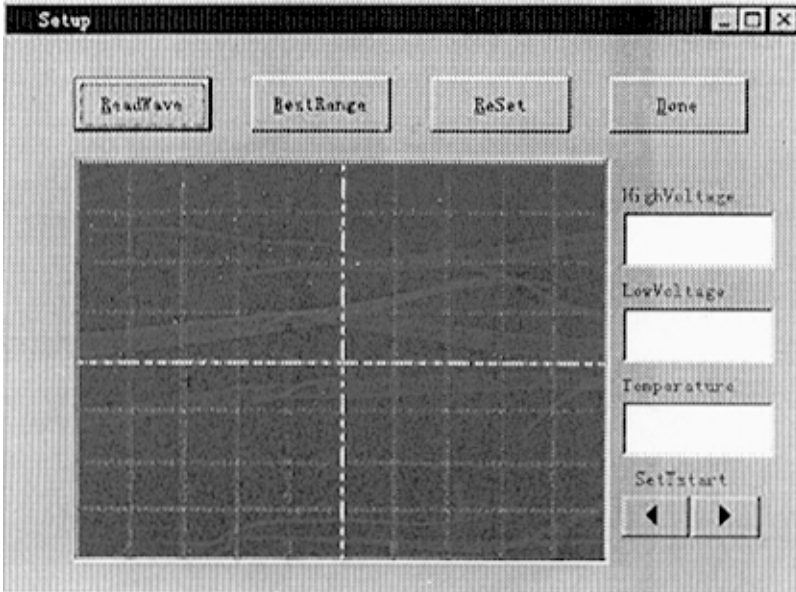


图 2.示波器设置对话框

调节示波器到最佳测试范围内。如果想重新调试示波器则只需按下 **ReSet 按钮**:示波器中偏压范围与偏压偏移则回到初始状态。调试结束后只须要按下 **Done 按钮**。退回到 FFT-DLTS 测试面板。

在 High_V 与 Low_V 文本框中分别输入已经选取的适当的脉冲偏压，在 AverageT 文本框里输入瞬态谱的平均次数，在 Step_T 文本框里输入测试温度步长，在 End_T 文本框中输入测量的结束温度。

FFT-T 按钮: 按下此按钮，计算机作为控制者(controller)开始指导测试仪器工作进行 DLTS 测试。

Stop 按钮: 按下此按钮可以中途终止 DLTS 测试。

SaveAs 按钮: 系统进行完 DLTS 测试之后，按下此按钮可以把测试好的数据以二进制模式存储在硬盘上。

Exit 按钮: 测试结束后，按下此按钮正常退出该测试程序。

附录三 FFT-DLTS 数据处理软件使用说明

运行 Desector.exe 或者在 Vb3.0 的环境下运行该程序。该程序读入已经存储的瞬态谱数据文件,对该数据文件进行 FFT-DLTS,FDLTS 或者率窗 DLTS 数据处理,再把计算得到的重要的参数输出到一个 DAT 文件。

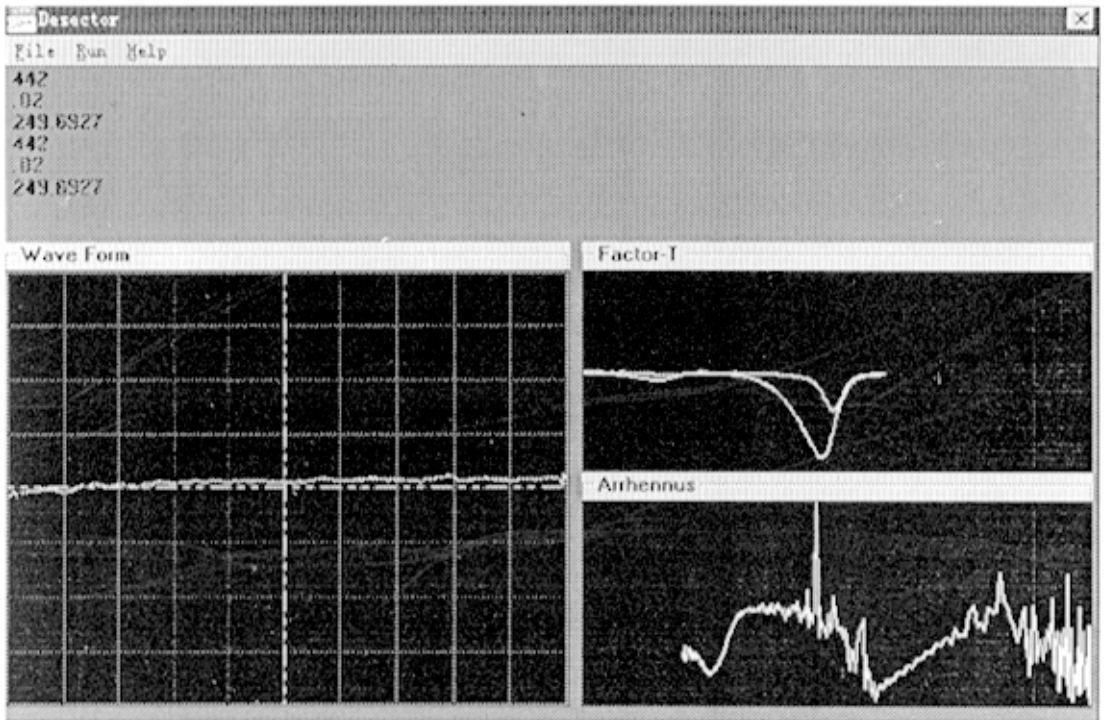


图 3: FFT-DLTS 数据解释处理程序对话框

该程序同样可以模拟单能级或者多能级的深能级的瞬态谱,可以用来对多能级快速傅立叶深能级瞬态谱进行迭代处理。