

电子线路题解

第一册

[日] 斋藤正男 著

高远 译

于志成 校

44

高等教育出版社

《电子线路题解》系根据日本大学电子线路课程的发展趋向，总结了著者的教学经验而编写成的。全书共两册。第一册为基础知识和线性电路，第二册为补充知识和非线性电路与时变电路。本书的习题是经过精心挑选的，著者企图不仅提供“思考的材料”，而且要教给“思考的方法”。

本书可供高等工科大学无线电、电子类专业的师生和有关科技人员参考。

责任编辑 谭骏云

大学 電子回路演習 [I]
课程

株式 昭 晃 堂 1978
会社

电子线路题解

[日] 斎藤正男 著

高 远 译

于志成 校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.125 字数 169,000

1983年2月第1版 1984年6月第1次印刷

印数 00,001—26,200

书号 15010·0474 定价 1.15 元

译者的话

“电子线路题解”是根据日文《大学课程电子回路演习》译出的。作者斋藤正男教授是日本东京大学医用电子研究中心负责人，目前国际医用电子与生物工程学会主席。他写过十几本深受欢迎的书。

“电子线路题解”一书分第一、二两册。第一册为基础知识和线性电路，主要包括电子器件的物理性质、特性及其表示、网络的计算、有源二端与四端网络、实际放大电路等。第二册为补充知识和非线性电路与时变电路，主要包括非线性电路的分析、自激振荡电路、时变电路、调制与解调、数字电路基础、电子系统的设计等。本书可供高等工科大学无线电、电子类专业的师生和有关科技人员参考。

正如作者所说，本书是本着向学生不单提供“思考材料”，而且提供“思考方法”的精神而写的，所以在习题的选择和解答上，具有独特的见解和风格。深信本书会对我国的读者有所裨益。

本书第一、二章由刘明亮同志译出，第四章由李北光同志译出。于志成同志对全书进行了校订。在翻译过程中曾得到哈尔滨科技大学肇永同志和哈尔滨工业大学李家泰同志的帮助，在此谨致谢意。

限于水平加上时间仓促，错误与不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

高 远 1982.6 于哈尔滨工业大学

中译文版序言

本书是根据日本大学三年级和四年级学生的电子线路教材发展趋势,融进个人想法,并尽可能以新的盛行着的思考方法写成的。

近年来,电子技术的发展是急剧的。因此,在大学即使把实际技术教得非常详细,几年内也不能完全起作用。这种情况逐渐多起来了。对学生来说,与其教给他们一些基本应用的思考方法,还不如教给他们将来遇到大学没学过的技术革新时通过自己努力就能掌握的那些重要的思考方法。

如果从这种思考方法出发,那么电路、电子线路、控制电路等的教材不必有特殊的区别,也许把所谓的系统表示、分析、设计所有这些综合起来会好些。然而,这毕竟是一个极端的方法。在日本还存在与10年、20年前一点也没有变化的方式,也有一边详细地作电路图计算,一边进行电子线路讲授的大学。

尽管电子工程技术本身确实在发展,但与之相对应的有关教材究竟应该怎样还没有得出应有的结论。正因为如此,大学教材还不能满足需要。教材的内容必须考虑到中小学教育、学生的能力以及社会的要求等综合情况。

这次由于哈尔滨工业大学高远先生的努力,出版了本书的中译版本,我感到很高兴。在此谨对以高先生为首的有关各位先生表示深深的谢意,同时期待着适合中国实际情况的教材体系能更好更多地出现。

斋藤正男

1982.1 于日本东京

序 言

电子线路这门课的体系,近年来发生了很大的变化。当然,情况不全是一样。有的大学仅仅是将原来教材中的电子管改为晶体管而已。但我认为,既然社会上电子工业发生了巨大的变化,那么大学的教学内容也要有相应的变动。大学教育,特别是工学院本科教育,决不只是把高材生集中起来就算了,而首先是向他们传授基本的治学态度。如果这种观点成立的话,那么教师在本科教育中不单单向学生提供“思考的材料”,而且必须把“思考的方法”本身教给学生。而在本科教育中只教给时髦的方法,培养只懂得理论,“将来要算就会算”而实则不会算这样的学生是不行的。即便是基本教材,其内容也应该是与具体的、实际的知识相联系的。

从上述观点出发,我曾写了《线性电子线路》一书,出版后荣幸得到读者好评。与此同时,读者还希望有习题集。这次出版的电子线路题解分为第一、二两册,然而内容并不只限于线性电路。本书是大体上考虑了想学电子线路的本科学生的水平的。本来也没有一定要把本书和拙著《线性电子线路》并用的意图。本书可以单独作为教科书或参考书。但是,由于两者的内容程度相仿,因此,如果配合起来使用会更好些。

本书的习题是经过精心挑选的,所以读者要亲自演算,认真探讨。就这一点而言,本书与其它常见的习题集不同,它不只是光浏览一下题目和解答,就能掌握其中的共同模式。本书所列习题,每一道都独具特色,希望读者能认真研究。

本书的第一册为基础知识和线性电路,第二册为补充知识和非线性与时变电路。可能的话,最好按第一、第二册的顺序阅读,

但已具备第一册基础知识的读者只读第二册也是可以的。不过读者通过本书增强实际能力后,切勿停滞不前,还要在解决实际问题的过程中不断充实提高。

本书本应早些出版,但由于各种原因而推迟了。

谨向在此期间给予大力支持的昭晃堂阿井国昭先生以及在原稿整理过程中给予帮助的工学士又吉正治先生表示谢意。

斎藤正男

1978年3月

目 录

第一章 电子器件的物理性质

§ 1.1 本征半导体	1
§ 1.2 杂质半导体	5
§ 1.3 扩散现象	8
§ 1.4 pn 结	13
§ 1.5 其它现象	19

第二章 电子器件与特性

§ 2.1 特性曲线与等效电路	22
§ 2.2 二极管的静态特性	25
§ 2.3 二极管的动态特性	29
§ 2.4 结型晶体管的工作原理	32
§ 2.5 基本特性	35
§ 2.6 大信号特性	38
§ 2.7 晶体管的动态特性	40
§ 2.8 场效应晶体管	44

第三章 电子器件的表示法

§ 3.1 二端网络	47
§ 3.2 四端网络	50
§ 3.3 四端网络的计算	54
§ 3.4 四端网络的连接	56
§ 3.5 三端网络	58
§ 3.6 S 矩阵	63
§ 3.7 互易性	65

§ 3.8 有源性	67
§ 3.9 内部电源的处理	70

第四章 网络的计算(1)

§ 4.1 回路方程	72
§ 4.2 几个定理	75
§ 4.3 功率的计算	82
§ 4.4 拉普拉斯变换与传递函数	86
§ 4.5 固有振荡与稳定性	90
§ 4.6 一阶和二阶系统	94
§ 4.7 频率特性与过渡响应	99

第五章 有源二端网络

§ 5.1 有源性与非线性	103
§ 5.2 工作点的确定	107
§ 5.3 负阻放大器	111
§ 5.4 单向性电路	114
§ 5.5 特性的计算	117

第六章 有源四端网络

§ 6.1 工作点的确定	122
§ 6.2 接地型式与特性	129
§ 6.3 基本电路与特性	133
§ 6.4 功率的计算	140
§ 6.5 大信号工作与功率	142
§ 6.6 多端有源元件	146

第七章 网络的计算(2)

§ 7.1 傅立叶级数	151
§ 7.2 调谐回路	157

§ 7.3	反馈现象	163
§ 7.4	稳定性的判定	168
§ 7.5	回路函数	172
§ 7.6	信号流图	176
§ 7.7	状态方程与相平面	180

第八章 实际放大电路

§ 8.1	噪声	185
§ 8.2	工作点的变动	192
§ 8.3	伪输出的计算	195
§ 8.4	反馈放大器	200
§ 8.5	多级放大器	204
§ 8.6	窄带放大器	207

第一章 电子器件的物理性质

因为本书是为了学习电子线路的基本分析方法，所以并不太深入涉及半导体的内部现象。但是，在学习电子线路时，如果具有半导体物理性质的一般知识，那仍将是非常有用的。在这一章里，不拟以量子力学等知识为前提，而想以直观地理解电子器件的内部现象为目的。

§ 1.1 本征半导体

锗、硅等 IV 族元素，在原子的外层轨道上有 4 个价电子[见图 1.1(a)]。彼此相邻的原子由两个共有价电子结合起来，从而形成单晶[图 1.1(b)]。这种材料人们称之为半导体。

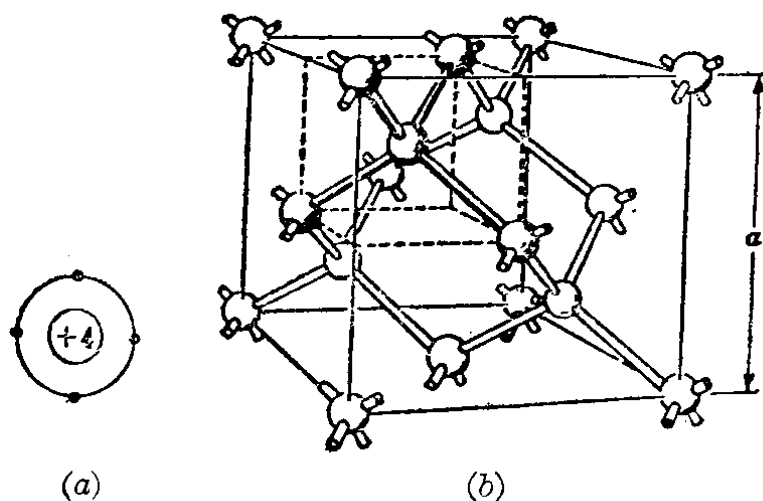


图 1.1

〔习题 1.1〕 所谓锗、硅单晶的菱形晶体结构，是一个棱长为 a 的立方体，如图 1.1(b) 所示。在立方体的各顶点，各个面中心和立方体内部的四个点上分别排列着原子。 a 称之为晶格常数，硅单晶的 $a = 5.42 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。试问 1 cm^3 的硅单晶中，有多少个原子？

〔解〕 考虑到图 1.1(b) 的立方体包含的原子和相邻的立方体共有的情况,若求每个立方体含有原子的平均个数,则有

顶点原子: $8 \text{ 个} \times \frac{1}{8} = 1 \text{ 个}$

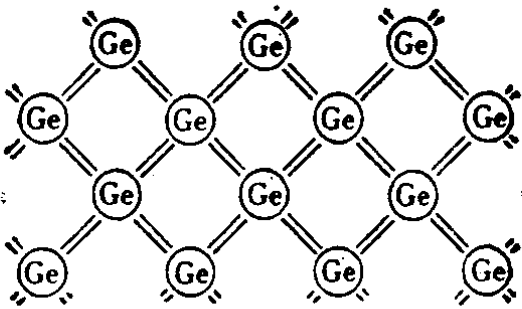
面中心原子: $6 \text{ 个} \times \frac{1}{2} = 3 \text{ 个}$

内部原子: 4 个

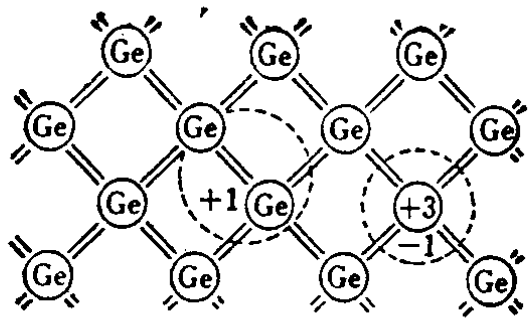
这就是说, 每个立方体平均包含 8 个原子. 所以 1cm^3 的硅单晶含有的原子个数为

$$\frac{1}{(5.42 \times 10^{-8})^3} \times 8 \text{ 个} = 5.00 \times 10^{22} \text{ 个}$$

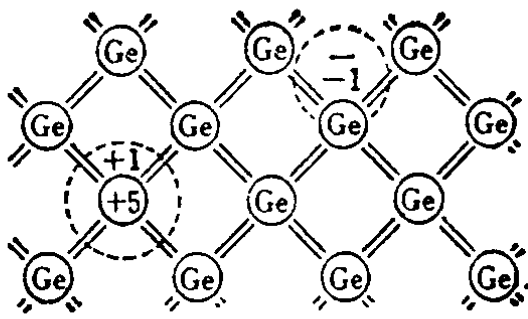
在纯硅单晶内, 如图 1.2 (为简单起见, 将图 1.1 的晶格结构作了部分改动, 画成了平面形式) 所示, 因为所有的价电子组成共价键, 所以不能移动. 这时并不存在自由电子, 因此不会有电流. 然而, 实际上由于热能的缘故, 会有一部分价电子从晶体结构中挣



(a) 本征半导体



(b) P型半导体



(c) n型半导体

图 1.2

脱出来,成为自由电子(简称为电子),结果在其原来位置留下空穴(电子的空位)。在纯净半导体(本征半导体)中,电子与空穴一定是成对地产生或消失,通常它们具有同样的数量。电子与空穴带有电荷,由于它们运动便产生电流。人们把这些带电粒子叫做载流子。

空穴-电子对的热激发率随温度而变化,由下式给定:

$$g(T) = c_1 T^3 e^{-qE_g/kT} \quad (1.1)$$

式中 c_1 为常数, $-q$ 为电子的电荷量, k 为波尔兹曼常数*, T 为绝对温度, E_g 称作能级常数,而且, $E_g = 1.12 \text{ V}$ (硅), $E_g = 0.72 \text{ V}$ (锗)。

另一方面,电子与空穴在半导体内运动期间如果相碰,则电子进入空位(即复合),于是它们便一起消失。其复合率与化学反应相同,即与电子密度 n 和空穴密度 p 的乘积成比例:

$$c_2 pn \quad (1.2)$$

在平衡状态,式(1.1)与式(1.2)相等,即有

$$pn = g(T)/c_2 \quad (1.3)$$

在不含杂质的半导体中, p 与 n 通常相等。这里,若

$$p = n = n_i \quad (1.4)$$

由式(1.1)与式(1.3)则得

$$n_i = AT^{3/2} e^{-qE_g/2kT} \quad (1.5)$$

再者在室温下,式(1.3)给出的 pn 的乘积,对硅来说为 $4.62 \times 10^{21} \text{ cm}^{-6}$,对锗来说为 $6.25 \times 10^{26} \text{ cm}^{-6}$ 。

〔习题 1.2〕 试用式(1.5)讨论本征半导体的载流子密度 n_i 随温度变化的情况。

〔解〕 对式(1.5)的两边取对数,然后微分,便得到下式:

* $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

$$\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dT} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dT} + \frac{3}{2} \frac{1}{T} + \frac{qE_g}{2kT^2} \quad (1.6)$$

忽略等式右边第一项, 如果代入数值, 那么等式右边大体由第三项决定. 其值对于硅为 0.07, 对于锗为 0.05, 也就是说, 当温度变化 1°C 时, n_i 变化 7% (硅), 5% (锗).

如果在半导体内施加电场, 那么空穴和电子受电场的作用, 将以一定的平均速度移动. 其速度与电场 E 成正比并可写为

$$\mu E \quad (1.7)$$

比例常数 μ 称为迁移率.

在硅中, 空穴迁移率 $\mu = 490 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 电子迁移率 $\mu = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 在锗中, 空穴迁移率 $\mu = 1900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 电子迁移率 $\mu = 3900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 通常以电流形式观测载流子的运动, 这个电流称为漂移电流.

〔习题 1.3〕 试推导半导体的电导率公式.

〔解〕 若电场为 E , 空穴与电子的迁移率分别为 μ_p , μ_n , 则它们的运动速度分别为 $\mu_p E$, $\mu_n E$, 因此其合成电流密度为

$$q(\mu_p p + \mu_n n) E \quad (1.8)$$

从而电导率由下式给定:

$$\sigma = q(\mu_p p + \mu_n n) \quad (1.9)$$

〔习题 1.4〕 试求在室温下纯硅与纯锗的电导率.

〔解〕 在硅中, 因为 $n_i^2 = 4.62 \times 10^{21}$, 即 $p_i = n_i = 6.8 \times 10^{10}$, 所以硅的电导率为

$$\sigma = 2.00 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$$

同样地, 锗的电导率为

$$\sigma = 2.32 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$$

§ 1.2 杂质半导体

在纯净的 IV 族半导体中加入 III 族或 V 族元素(杂质), 就把晶体晶格中的 IV 族原子和加入的杂质统称为杂质半导体. 若加的杂质为 III 族元素, 由于缺少一个价电子, 则将产生空穴; 若所加的杂质为 V 族元素的情形, 由于多出一个价电子, 则将产生自由电子(图 1.2). 人们把前者叫做 p 型半导体, 后者叫做 n 型半导体, 并且把杂质分别叫做受主(III 族元素)与施主(V 族元素).

〔习题 1.5〕 假如杂质半导体的杂质浓度为 $N=10^{17}$ 个/ cm^3 , 试问这时 IV 族原子中有多少个原子被杂质原子所代替(设材料为硅)?

〔解〕 参照习题 1.1 的结果, 则有

$$10^{17}/5 \times 10^{22} = 2 \times 10^{-6}$$

即有 0.0002% 的原子被杂质原子代替, 只不过非常少而已.

〔习题 1.6〕 假设硅的 p 型半导体的受主浓度为 $N_a=10^{17}$ 个/ cm^3 , 试求该材料中的空穴密度、电子密度.

〔解〕 正确的计算应该这样进行: 受主产生与其本身数量相同的空穴. 假定原来的 IV 族原子因热激发产生的空穴、电子密度分别为 p_0 与 n_0 , 根据热激发与复合的平衡关系, 下式应该成立:

$$(p_0 + N_a)n_0 = n_i^2 = 4.62 \times 10^{21} \quad (1.10)$$

$$p_0 = n_0 \quad (1.11)$$

可以联立解上二式. 但是, 若看一下 N_a 的数值就会知道 p_0 与 n_0 远小于 N_a , 因此可以进行如下的近似计算. 由式 (1.10) 得到

$$n_0 \approx n_i^2 / N_a = 4.62 \times 10^4$$

该数就等于 p_0 . 因此空穴密度为 $p = p_0 + N_a \approx N_a = 10^{17}$ 个/cm³, 自由电子密度为 $n_0 = 4.62 \times 10^4$ 个/cm³.

〔注〕 在这种情况下, 空穴叫做多数载流子, 电子叫做少数载流子. 在 n 型半导体中, 情况正相反.

〔习题 1.7〕 试问前题中的半导体材料的电导率等于多少呢?

$$〔解〕 \quad \sigma = q(\mu_p p + \mu_n n) = 7.8 \text{ S/cm}$$

〔注〕 电导率大致由 $p \approx N_a$ 确定, 因此它远大于本征半导体的电导率.

〔习题 1.8〕 假设由于某种原因, 前题的半导体材料中的电子密度上升到 n_1 . 如果这样, 那么后来电子密度将发生什么变化?

〔解〕 如果放置一块半导体材料, 则将发生热激发与复合. 由于杂质原子与原来的 IV 族原子相比极少, 因此热激发与本征半导体相同, 可由式(1.1)给定. 同时复合率与空穴密度、电子密度的乘积成比例, 可由式(1.2)给定. 这样, 电子密度的变化率可由下式给定:

$$\frac{dn}{dt} = g - c_2 p n \quad (1.12)$$

式中 g 与 c_2 均是由温度确定的常数.

另一方面, 因为空穴密度本来就是一个很大的数, 所以它即使略有增减, 也不会带来多大的影响. 因此大体可以认为 $p \approx N_a$, 即

$$\frac{dn}{dt} = g - c_2 N_a n \quad (1.13)$$

使上式左边等于零的状态是平衡状态, 这时的电子密度 n_0 由

下式给定:

$$n_0 = g/c_2 N_a \quad (1.14)$$

把与平衡状态电子密度的差 n_e , 即

$$n_e = n - n_0 \quad (1.15)$$

称为过剩电子密度. 将式(1.15)代入式(1.13)中去, 则得到如下对 n_e 的微分方程:

$$\frac{dn_e}{dt} = -c_2 N_a n_e = -\frac{1}{\tau_n} n_e \quad (1.16)$$

式中 $\tau_n = 1/c_2 N_a$ 称为该材料的电子寿命. 式(1.16)的解为

$$n_e = n_{e0} e^{-t/\tau_n} \quad (1.17)$$

式中 $n_{e0} = n_1 - n_0$ 是过剩电子密度的初始值.

〔习题 1.9〕 如果用一定强度的光照射 n 型硅, 则每秒将产生 10^{16} 个/cm³ 的空穴电子对. 试讨论用光照射相当长时间而停止时的空穴密度变化的情况. 假设空穴的寿命为 1 ms.

〔解〕 空穴密度的变化率由下式给定:

$$\frac{dp}{dt} = g + g_L - c_2 N_a p \quad (1.18)$$

式中 g 表示热激发率, g_L 表示光激发率, N_a 为施主密度.

和前题一样, 如利用过剩空穴密度 $p_e = p - p_0$ 及 $p_0 = g/c_2 N_a$ 改写微分方程, 则有

$$\frac{dp_e}{dt} = -\frac{1}{\tau_p} p_e + g_L \quad (1.19)$$

式中 τ_p 是空穴寿命.

在初始条件 $p_e = 0 (t = 0)$ 下解方程, 则得到下式:

$$p_e = \tau_p g_L (1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (1.20)$$

$\tau_p g_L = 10^{13}/\text{cm}^3$ 是用光照射达到稳定

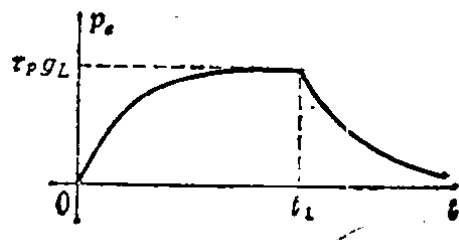


图 1.3

状态时的过剩空穴密度.

照射停止时, 式(1.19)中 $g_L=0$. 在初始条件 $p_e=\tau_p g_L(t=t_1)$ 下解方程, 则有

$$p_e=\tau_p g_L e^{-(t-t_1)/\tau_p} \tag{1.21}$$

若把上述情况用图表示, 则如图 1.3 所示.

§ 1.3 扩散现象

半导体中存在着各式各样的带电粒子. 虽然杂质原子因排列在晶体晶格之中不能移动, 但空穴和电子在材料中却能运动. 这些载流子之所以运动是因为有下面两个原因:

(1) 如果施加电场, 就对电荷产生作用力, 使带电粒子开始运动. 人们称这种运动为漂移, 这种现象前面已经作了说明.

(2) 如果载流子的密度不同, 带电粒子除了作不规则的运动外, 还要从密度高的地方流向密度低的地方. 这种现象称为扩散现象.

扩散的粒子流量(通过每单位横截面积的粒子数) f (个/cm²·s) 与该点的粒子密度梯度成正比.

$$f=-D_p \frac{dp}{dx} \quad \text{或} \quad f=-D_n \frac{dn}{dx} \tag{1.22}$$

式中负号表示粒子向密度小的方向移动. D_p 与 D_n 是比例常数, 分别叫作空穴、电子的扩散常数. 其值是: 在锗中 $D_p=49.3\text{ cm}^2/\text{s}$, $D_n=101\text{ cm}^2/\text{s}$; 在硅中 $D_p=12.4\text{ cm}^2/\text{s}$, $D_n=35\text{ cm}^2/\text{s}$. 并已确切查明, 无论在什么材料中, 扩散常数与迁移率 μ 之间存在如下关系:

$$\frac{\mu}{D}=\frac{q}{kT} \tag{1.23}$$

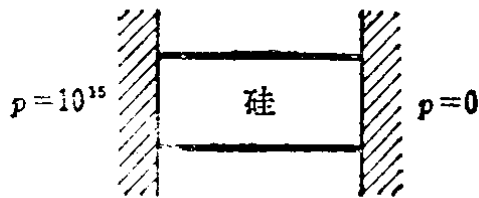


图 1.4

〔习题 1.10〕 如图 1.4 所示, 在横截面为 1 mm^2 , 长为 1 mm 的硅中,