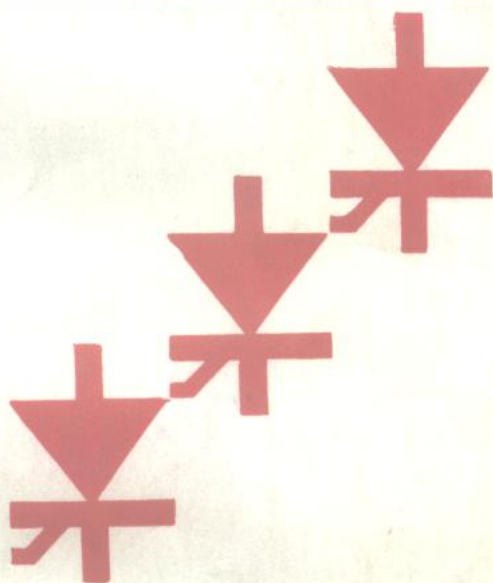


晶闸管



[西德]

W. 格尔拉赫 著

机械工业出版社

晶 闸 管

〔西德〕 W. 格尔拉赫 著

卞 · 抗 译

顾 廉 楚 校



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地论述了晶闸管（习称可控硅元件）的物理过程，用近似的和精确的方法分析了晶闸管的各种稳态和动态特性，如正向和反向、开通和关断以及触发等特性，并对上述特性和器件的参数进行定量分析。书中还详细地阐述了对器件制造过程中极为重要的表面击穿、导通和关断时的负载能力、触发机理、少子寿命的调节以及有关改善上述特性和参数的工艺措施等，并介绍了双向二极晶闸管、双向三极晶闸管、可关断晶闸管和光控晶闸管等派生器件。

本书可供从事晶闸管研究、设计、制造、应用的工程技术人员以及大专院校师生阅读。

Thyristoren

Willi Gerlach

Springer-Verlag

1979

* * *

晶 闸 管

〔西德〕 W. 格尔拉赫 著

卞 抗 译

顾 廉 楚 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $10\frac{1}{2}$ · 字数 276 千字

1984 年 9 月北京第一版·1984 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001-4,700 · 定价 2.00 元

*

科技新书目： 80-100

统一书号：15033·5649

译 者 的 话

本书是根据西德W. 格尔拉赫著的《晶闸管》(半导体电子学丛书第12分册)的第一版(1979年版)翻译的。

作者W. 格尔拉赫博士是柏林工业大学教授,曾经长期从事晶闸管的研究和教学工作,对晶闸管的发展作出过许多有影响的贡献。

本书系统地从稳态到动态阐述了晶闸管的理论和实践,特别是对晶闸管的动态特性作了详细的分析。书中完整地提供了定量计算公式,可作为设计与研究晶闸管的重要理论依据。本书不仅在西德广为传播,同时在美国也已出版发行。

本书由西安整流器研究所卞抗同志翻译,清华大学自动化系顾廉楚副教授校阅。由于译者水平有限,书中难免有错误或不妥之处,希望读者批评指正。

译 者

前 言

晶闸管在电子学，特别是在电力电子学中的重要性正在日益增加，使得不论是器件制造者还是器件使用者都有必要系统地了解这种器件的基本物理知识和工艺概况。本书提供了上述两方面的内容。

本书的目的，是力图向读者提供这方面的入门知识。阅读本书，需要有半导体物理，特别是晶体管的基本概念作为基础知识；在数学方面，则没有特殊的要求，只要有微积分和复变函数的知识就够了。

在概论部分，借助于由两只晶体管组成的晶闸管等效模型解释了晶闸管的典型特性，其中瞬态过程占有重要地位。多年的教学经验表明，用这种方法，可以简单而明了地理解其物理过程，特别是中间 pn 结的换向问题。

在以后几章中，论述了正向和反向的稳态特性以及导通特性的理论，而动态特性占了很大篇幅，因为它对晶闸管的实际使用具有特别重要的意义。此外，还运用了不同的运算方法，并把近似方法，例如电荷控制模型，与精确的方法作了比较。接着，详细地研究了轴向和横向的开关过程。双向二极晶闸管，双向三极晶闸管，可关断晶闸管和光控晶闸管则合起来单独列为一章。除此之外，还论述了表面击穿，开关过程中的负载能力、级联触发，寿命控制以及与其工艺措施有关的各种问题。

本书原来应该由 G. 科尔 (G. Köhl) 博士——一位在晶闸管方面富有经验的和令人尊敬的专家来写。但是，他的过早逝世使得这个计划遗憾地落空了。在他逝世以后，我作为他的长期同行和朋友，接受了这个光荣的任务。我全力以赴地完成了这个任务。

G. 科尔博士特别擅长于双向晶闸管。出于对他的敬佩，我从

IV

他的笔记本中引用了他对双向晶闸管的论述，并在第 9.1 至 9.3 节中作了深入而忠实的阐述。

我特别要感谢 E. 朔莫居 (E. Schomogyi) 女士，她全力以赴地工作，不仅完成了手稿的誊清，而且完成了出版印刷前的准备工作。我还要感谢施普林格 (Springer) 出版社的充分谅解和乐于助人的合作。

W. 格尔拉赫
柏林，1979年春季

目 录

译者的话

前言

概论	1
1 晶闸管原理	5
1.1 晶闸管等效模型	5
1.2 开通条件	6
1.3 电流随时间的变化过程	8
1.4 由阻断状态向导通状态的转变	12
1.5 稳定的导通状态	17
1.6 稳态电流-电压特性曲线	19
1.7 特性曲线上的特征点	25
1.8 晶闸管等效模型和实验	33
2 正向时晶闸管的稳态特性	33
2.1 无电流状态	33
2.2 电位分布	41
2.3 pn 结的相互影响	42
2.4 电荷平衡	44
2.5 特性曲线方程式	45
2.6 载流子倍增	49
2.7 特性曲线的作图法	51
2.8 特性曲线的计算	60
3 导通特性理论	63
3.1 引言	68
3.2 pin 二极管模型	79
3.3 导通特性曲线的不同区域	77
3.3.1 区域 1: 两个基区均为小注入	78
3.3.2 区域 2: P 基区为小注入, n 基区为大注入	78
3.3.3 区域 3: 两个基区均为大注入	81
4 阻断能力	86

4.1	反向阻断能力	86
4.1.1	电位分布	86
4.1.2	反向特性曲线	87
4.1.3	反向电压极限值	89
4.1.4	最佳反向阻断能力	92
4.2	正向阻断能力	96
4.3	用发射极短路点改善正向阻断能力	98
4.4	半导体表面对阻断能力的影响	100
4.4.1	理想的和实际的半导体表面	100
4.4.2	表面击穿	103
4.5	防止表面击穿的措施	105
4.5.1	磨斜角	105
4.5.2	场限制环	111
5	分析瞬态过程的方法	113
5.1	准稳态处理	113
5.2	电流快速变化情况下的电流平衡	115
5.3	传递函数	117
5.4	频率特性	120
5.5	电荷控制模型	121
5.6	电荷控制模型和前述两种分析方法的比较	128
5.7	随时间变化的电流方程及连续方程的解	130
6	开通特性	140
6.1	定性的描述	140
6.1.1	触发条件	140
6.1.2	储存电荷的建立	141
6.1.3	电流-电压瞬变曲线	144
6.2	两个基区均为小注入时开通过程的计算	145
6.2.1	问题的提出	145
6.2.2	求解的方法	148
6.2.3	对称晶闸管的电流和载流子浓度的瞬变过程	151
6.2.4	过渡到稳态载流子分布	160
6.2.5	过渡到稳态过程中的电压瞬变过程	167
6.3	n 基区为大注入时开通过程的计算	168
6.3.1	问题的提出	168
6.3.2	电流瞬变过程	170
6.3.3	n 基区中载流子浓度和电场强度的瞬变曲线	175
6.3.4	n 基区中的电压降	177

6.3.5	基区宽度对 n 基区中电压降的影响	173
6.3.6	向稳定导通状态的过渡	181
6.4	建立在电荷控制模型基础上的开通过程的理论	189
6.5	各种因素对开通过程的影响	192
6.5.1	电流放大系数随电流的变化	192
6.5.2	基区宽度调制	194
6.5.3	在门极基区中的漂移场	195
7	大面积晶闸管的门极电流触发	196
7.1	引言	196
7.2	初始触发区	199
7.3	瞬态的载流子分布和电位分布	206
7.4	扩展过程	210
7.5	触发扩展的理论模型	214
7.5.1	扩散模型	214
7.5.2	漂移模型	217
7.6	触发扩展的实验研究	218
7.6.1	测试方法	218
7.6.2	电流的影响	221
7.6.3	结构参数的影响	223
7.7	触发扩展对晶闸管动态特性的影响	225
7.8	提高开通负载能力的方法	226
7.8.1	级联触发的原理	227
7.8.2	级联触发的实现	228
7.8.3	渐开线门极	232
8	关断特性	234
8.1	引言	234
8.2	载流子储存效应	235
8.3	参数	238
8.4	突变的电流换向	244
8.5	根据电荷控制模型来计算开关时间	247
8.5.1	问题的提出	247
8.5.2	第一储存时间	248
8.5.3	第一下降时间	250
8.5.4	第二储存时间	252
8.5.5	第二下降时间	254
8.5.6	关断时间	254
8.6	关断过程的准确计算	256

8.6.1	引言	256
8.6.2	问题的提出	257
8.6.3	解法	259
8.6.4	一般情况下空穴浓度的变化曲线	262
8.6.5	在两种不同起始分布情况下的空穴浓度的变化过程	262
8.6.6	电流特性曲线	265
8.6.7	与电荷控制模型的结论进行比较	265
8.7	两个基区皆为大注入时的耗尽过程	266
8.8	缩短关断时间的措施	268
8.8.1	降低少数载流子的寿命	268
8.8.2	增加发射极短路点	270
8.8.3	加负的门极电压	271
9	晶闸管的派生器件和特殊的门极结构	274
9.1	双向二极晶闸管(Diac)	274
9.2	触发双向晶闸管用的门极结构	275
9.2.1	一般要求	275
9.2.2	晶体管门	276
9.2.3	势垒区门	278
9.2.4	带有辅助层的晶闸管触发	279
9.3	具有四种门功能的双向晶闸管(Triac)	280
9.4	可关断晶闸管	283
9.4.1	关断所需的门极电流	283
9.4.2	关断增益	284
9.4.3	关断时间	285
9.4.4	实际晶闸管中的情况	287
9.4.5	横向关断过程	288
9.4.6	门极-阴极结构	291
9.5	光控晶闸管	291
9.5.1	原理	291
9.5.2	光谱灵敏度	294
9.5.3	光源	294
9.5.4	光的触发灵敏度	297
9.5.5	功率晶闸管的光触发	300
参考文献		301

概 论

晶体闸流管（以下简称为晶闸管）是具有 pnpn 结构的半导体器件，见图 I。在阳极 p 区和阴极 n 区之间施加正向电压时，它具有阻断和导通两个稳定的状态。由图 II 所示的电流-电压特性曲线可以看到，有一个阻断区和一个导通区。这一特性已被用于电流的接通或切断。

为了使晶闸管由阻断状态变为导通状态，电流必须增加到超过某个阈值。这通常可使脉冲电流通过门极而加于两个中间区中的一个来实现。另一种可能性是，不断提高阳极电压，并使之超过转折电压 (U_{BO})，见图 II a。

一旦晶闸管被开通或被“触发”，其特性就相当于一个二极管，见图 II b。此时，在正向它可以通过电流密度达几百安/厘米² 的电流，其压降不超过 1~2 伏。在反向则与此相反，它将处于阻断状态。考虑到这一特性，晶闸管的符号如图 I b

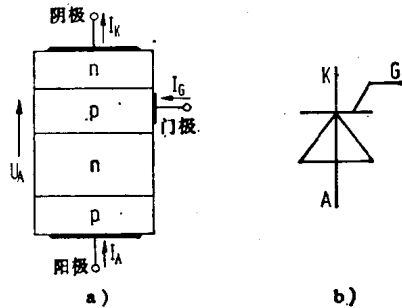


图 I 晶闸管

a) pnpn 结构 b) 符号

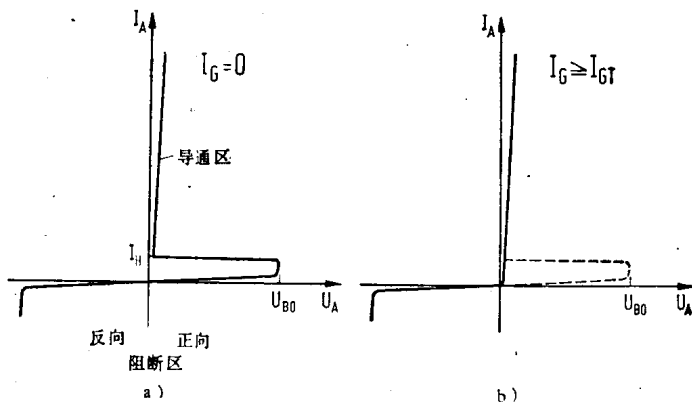
所示。它用一个带有门极引线的二极管来表示，这就表明晶闸管是一个可以控制的二极管，和早先的英文名称“Semiconductor Controlled Rectifier”（简称为 SCR，译名为半导体可控整流器或可控硅元件）相一致的。

表示晶闸管开通的术语“触发”，来源于闸流管的技术名词，在闸流管中曾用以描述气体放电的点火。闸流管的开通是指由阻断变为导通状态。由于晶闸管的作用和闸流管类似，因此，这一

概念被引用于晶闸管。同样，晶闸管的名称也是根据闸流管的名称引伸而来的。

在本书详细叙述晶闸管以前，先举一个典型的例子来说明如何利用晶闸管的开关特性。

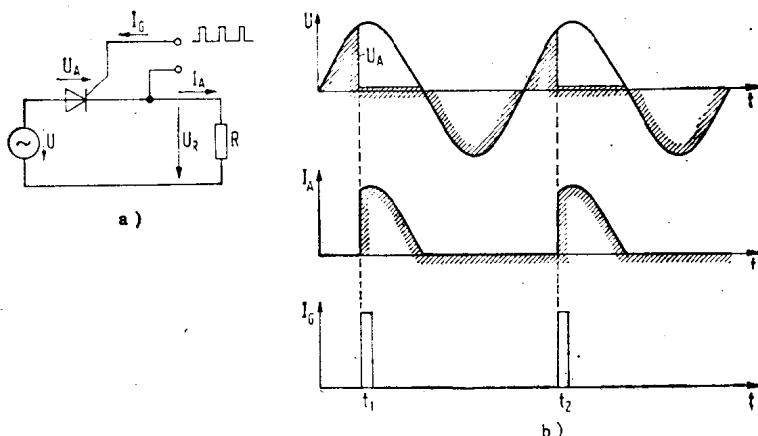
图Ⅲ是在交流电路中有一个晶闸管与一个电阻性负载相串联



图Ⅰ 晶闸管的电流-电压特性曲线

I_H —维持电流 I_{GT} —触发电流 U_{BO} —转折电压

a) 不加门极电流 b) 加门极电流 $I_G > I_{GT}$



图Ⅱ 用以控制交流回路负载功率的晶闸管电路

a) 电路 b) 相位控制原理

的电路，其中电源电压 U 小于晶闸管正反向阻断电压。因为没有门极信号时，晶闸管是阻断的，所以，在电压正半周时，时间 t_1 以前的电流 i 一直为零。如在此时刻，加上门极电流 I_g ，晶闸管即被触发。如果忽略晶闸管的通态电压，电路中电流在几微秒之内上升到 $i = U/R$ 值，此电流一直维持到该半周结束。当电流下降到维持电流 I_H 以下时，电路中电流就中断。

在电压负半周时，晶闸管一直是阻断的 ($i = 0$)。只是在随后的正半周中，在时间 t_2 时电流又重新流通。

通过触发时间的选择，能连续调节负载电阻上的平均功率。这种运行方式称为相位控制。

门极电流可以是一个窄脉冲，脉冲宽度应足以使晶闸管变为导通状态，随后则靠内部的放大机构维持导通。换句话说，门极电流起着触发信号的作用，该信号使得内部的放大机构工作。

在电流导通上，与开关晶体管相比，晶闸管有一个特殊的优点。因为在晶体管中，主电流流通的全过程中，这个控制信号必须始终维持着，这就使控制极回路消耗较多的功率，所以是不利的。

然而，在技术上具有最重大意义的是，晶闸管能够开关巨大的功率。现代功率晶闸管的开关功率极限可达到兆瓦级。相比之下，功率晶体管所能开关的功率只有几千瓦。这一区别的首要原因在于，晶闸管中通过欧姆接触能把主电流大面积地引出，而在晶体管中则不能。

在有放大特性的半导体器件中，晶闸管占有特殊的地位，它是唯一能打开强电领域大门的半导体器件。近年来，它已成为现代电力电子学的基石。然而，其应用范围绝不仅仅限于电力电子技术，相反，它几乎扩展到电工技术的整个领域。

下列器件都是晶闸管的亲密同族：

1. pnpn 二极管 (肖克莱 (Shockley) 二极管, 二极晶闸管);
2. 双向二极晶闸管 (双向或交流二极晶闸管);
3. 双向三极晶闸管 (双向或交流晶闸管);

4. 可关断晶闸管 (门极关断或 GTO 晶闸管);
5. 光控晶闸管 (光控开关或 LAS);
6. 四极晶闸管。

所有这些器件都是以 $pnpn$ 结构的开关特性为基础的, 因而从较为广泛的意义上来说, 也可以作为晶闸管来描述。

为了理解晶闸管的工作原理, 有必要预先掌握半导体中的电流通情况, 二极管和晶体管中的物理过程等某些基本知识。这里先假定读者已经掌握了这些预备知识, 其实, 如果有人对晶闸管特别感兴趣的话, 那么他也一定了解有关 pn 二极管和晶体管的一些初步知识。此外, 已出版的本丛书中的第 1 和第 2 册^①也可供参考, 因为这些必要的基本知识在这两册书中已有详细的论述。

① 第 1 和第 2 册系指西德已出版的半导体电子学丛书第 1 和第 2 册, 本书是该丛书的第 12 册——译者注。

1 晶闸管原理

为了了解晶闸管中开关的物理过程，先采用由两只晶体管组成的等效模型来代替晶闸管的 pnpn 结构。在莫尔 (Moll) 和他的同事们发现开通效应并作了理论解释后的一段时间内^[1.1]，几乎所有的 pnpn 器件的理论工作都是以这个模型为基础的。通常，只是利用能将 pnpn 结构从概念上分解为两个晶体管的方法。相邻 pn 结的相互影响，可以通过晶体管的作用，用已知的关系来描述。这个等效模型本身能相当完美地解释晶闸管的重要特性和推导典型的规律^[1.2]。并且，它还有可以比较简单地概括物理过程的优点。此外，这个模型可以通过实验直接比较而得到验证。

在以后各节中，晶闸管的作用原理就是用这个等效模型来解释的。

1.1 晶闸管等效模型

这个模型可用下列方法得到：设想按照图 1.1 a，沿虚线，把晶闸管的两个基区剪开随后用导线互相连接起来，如图 1.1 b 所示。在这个图中，去掉由基区上分开的靠外的 p 和 n 层区域，因为现在它对电流没有效用，这样就可以得到图 1.1 c 所示的等效模型。它由一个 pnp 晶体管和—个 npn 晶体管组成，并按上述方式互相连接起来。

在晶闸管的导通方向，正电压加于下面的 p 区即阳极上。两边的 pn 结 J_1 和 J_3 处于正向，因为此处 p 区相对于 n 区都是正的；与此相反，中间的 pn 结 J_2 则处于反向。

由于处于正向， J_1 和 J_3 结向邻近的基区注入少数载流子，起着发射极的作用，而处于反向偏置的 J_2 结则起着集电极的作用。

用。所以在等效模型中，一个晶体管的集电极总是和另一个晶体管的基区连接在一起的。

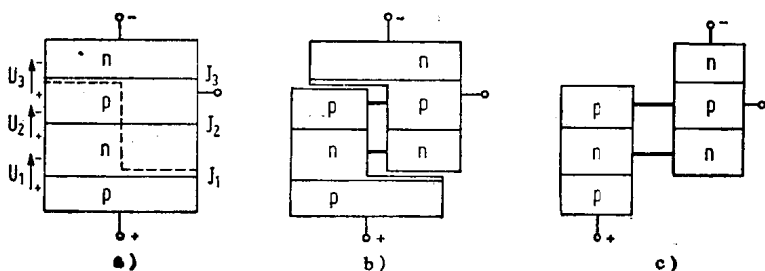


图1.1 用分割法把晶闸管结构分解成由两个晶体管组成的等效模型的步骤

1.2 开通条件

这两个晶体管必须满足哪些条件才能使晶闸管开通，这是首先应该讨论的问题。

按照图 1.2，假设电路处于稳定的阻断状态。电压 U_A 实际

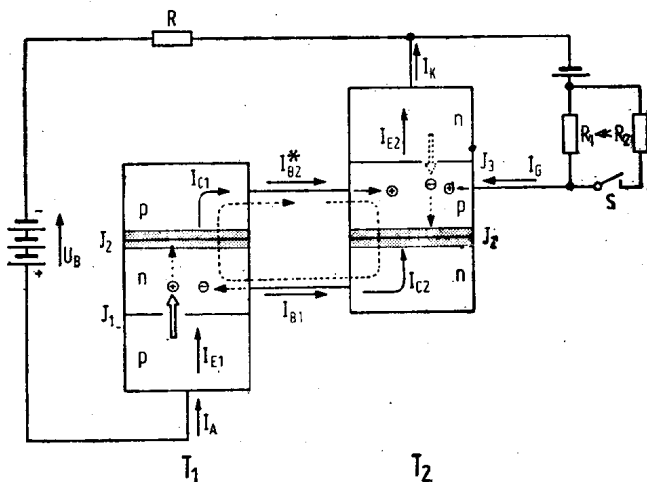


图1.2 正向偏置时的晶闸管等效模型

上是降于集电极的势垒区上；在外电路中，电流 $I_A = I_{A0}$ ，在数量级上与集电极漏电流 I_{C02} 或门极电流 I_{C0} 相当，并由其中大的一个来决定。

在 $t = 0$ 时，合上开关 S ，门极电流以增量 δI_G 突然增加。这样，晶体管 T_2 的基极电流由起始值

$$I_{B20} = I_{B20}^* + I_{C0} \quad (t < 0) \quad (1.1)$$

增加到

$$I_{B2}(0) = I_{B20}^* + I_{C0} + \delta I_G \quad (t = 0) \quad (1.2)$$

此时，发射极 J_3 变得更正向偏置。于是，更多的电子由发射极 J_3 注入基区，这些电子向集电极扩散，其中只有一部分在途中被复合掉，所以集电极电流增加了。

由于电子渡越时间的限制，在延迟时间 t_{v2} 以后，阳极电流才开始增加。为了简化，特作如下假设，经过延迟时间以后，集电极电流能够准确地陡增到新值。这样，可得到

$$\begin{aligned} \Delta I_{C2}(t_{v2}) &= \tilde{\beta}_2 \Delta I_{B2}(0) \\ &= \tilde{\beta}_2 \delta I_G \end{aligned} \quad (1.3)$$

其中 $\tilde{\beta}_2$ 是晶体管 2 在共发射极回路中的小信号电流放大系数。

同时，集电极电流 I_{C2} 也就是晶体管 T_1 的基极电流 I_{B1} 。它供给 n 基区电子。在 $t = t_{v2}$ 时，晶体管 1 的基极电流的增量为

$$\begin{aligned} \Delta I_{B1}(t_{v2}) &= \Delta I_{C2}(t_{v2}) \\ &= \tilde{\beta}_2 \delta I_G \end{aligned} \quad (1.4)$$

类似于晶体管 2，经过延迟时间 t_{v1} 以后，集电极电流增量为

$$\begin{aligned} \Delta I_{C1}(t_1) &= \tilde{\beta}_1 \Delta I_{B1}(t_{v2}) \\ &= \tilde{\beta}_1 \tilde{\beta}_2 \delta I_G \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中 $t_1 = t_{v1} + t_{v2}$ ； $\tilde{\beta}_1$ 是晶体管 1 的小信号电流放大系数。

另一方面，当集电极电流 I_{C1} 流回晶体管 2 的基区 ($I_{C1} = I_{B2}^*$) 时，即在 $t_1 = t_{v1} + t_{v2}$ 时，该电流在 T_2 中又使基极电流有一个新的陡增

$$\begin{aligned} \Delta I_{B2}(t_1) &= \Delta I_{B2}^*(t_1) \\ &= \tilde{\beta}_1 \tilde{\beta}_2 \delta I_G \end{aligned} \quad (1.6)$$