

半导体线路

复旦大学物理系编 上海人民出版社

23.62
191

半 导 体 线 路

(脉冲技术部分)

复旦大学物理系编

上海人民出版社

内 容 提 要

本书主要介绍半导体线路的原理、设计和应用。对常用的脉冲电路作了较为详细、具体的叙述,有关放大器、振荡器和电源设备则由半导体线路(放大、振荡、电源部分)介绍。

本书阅读的主要对象是有中等文化程度的工人、技术人员,亦可供大专院校有关专业的同志参考。

本书力求避免过深的数学分析,加强了物理概念的叙述,并介绍了一定数量的实用电路,以供参考。

半 导 体 线 路

(脉冲技术部分)

复旦大学物理系编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 14 375 插页 3 字数 390,000

1973年8月第1版 1973年8月第1次印刷

印数 1—150,000

统一书号: 15171·108 定价: 1.17 元

列宁语录

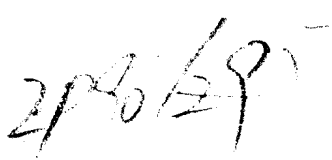
理论要由实践来鼓舞，由实践来修正，由实践来检验。

《怎样组织竞赛？》

毛主席语录

无产阶级认识世界的目的，只是为了改造世界，此外再无别的目的。

《人的正确思想是从那里来的？》



前 言

为了适应电子工业发展的需要,为了配合教育革命的实践,我们在校党委的领导和关怀下,先后在上海地区十几个有关工厂进行了广泛的调查研究,收集了工人同志和革命技术人员在生产和试制实践中创造和积累的大量实用电路,经过分析和综合,编写成这本《半导体线路》。

本书由于内容较多,因此,采用了分两册出版的方法。第一分册介绍放大器、振荡器和电源设备;第二分册介绍脉冲技术。读者可根据需要选择阅读。

在编写本书的过程中,我们力求以较为通俗的理论来阐明各种半导体线路的工作原理和设计方法,书中加强了物理概念的叙述,以获得理论与实践结合的效果。因此,本书可供从事半导体线路工作的同志和大专院校有关专业的同志参考。

在两年多的编写过程中,我们在上海无线电廿一厂和上海无线电仪器厂等有关单位的大力支持和热情帮助下,对本书的初稿和修改稿作了进一步的修改,使本书的质量有了一定的提高。但是,由于我们的政治思想水平和业务水平都不高,编写中存在的问题敬请读者在阅读过程中指正,以供修订时提高。

复旦大学物理系《半导体线路》编写组

一九七三年六月

目 录

第一章 脉冲的基本知识

第一节 概述	1
第二节 RC 电路和 RL 电路的暂态过程	5
一、 RC 电路的暂态过程	5
二、 RL 电路的暂态过程	9
第三节 基本的脉冲变换电路	11
一、微分电路	12
二、积分电路	15
三、 RC 分压器	19
四、削波(限幅)	22
五、箝位电路	27
第四节 晶体管的开关特性	33
一、晶体管的三个工作区域	33
二、晶体管的开关工作过程	34
三、在开关运用时晶体管功耗的计算	43
四、晶体管开关时间的测量	45

第二章 逻辑电路

第一节 正“与”门电路	47
第二节 正“或”门电路	51
第三节 “非”门电路(倒相器)	53
一、电路形式的改进	54
二、“非”门电路的负载能力	55
三、“非”门电路的设计	58
四、设计举例	66
第四节 门电路的连接和设计原则	69

第三章 双稳态触发电路

第一节 “集-基”耦合双稳态触发器	72
一、电路的工作原理	72

二、电路的正常工作条件	74
三、电路的输出波形	82
四、电路的触发方式与触发灵敏度	93
五、饱和型双稳态触发器的设计	102
六、双稳态触发器的实用电路	109
第二节 射极耦合双稳态触发器	114
一、电路的工作原理	115
二、电路的触发灵敏度与滞后电压	123
三、电路输出波形的暂态分析	132
四、电路的设计方法	139
五、实用电路	144
第三节 电流型双稳态触发器	146
一、互补式电流型双稳态触发器	149
二、用稳压管耦合的电流型双稳态触发器	158
三、电流型双稳态触发器的设计与实用电路	160
第四节 十进制计数器	164
一、二进制计数器	164
二、“二十”进制计数器	167
三、提高计数速度的方法	178

第四章 单稳态触发器与自激多谐振荡器

第一节 “集-基”耦合基极定时单稳态触发器	202
一、电路的工作原理	203
二、电路输出波形的分析与改进	212
三、电路的触发方式	216
四、“集-基”耦合单稳态触发器的设计	216
第二节 射极耦合基极定时单稳态触发器	219
一、电路的工作原理	220
二、电路输出波形的分析	230
三、电路的触发方式	234
四、射极耦合单稳态触发器的设计	234
第三节 射极定时单稳态触发器	238
一、电路的工作原理	239
二、电路输出波形的分析	246
三、恒流源与输出波形的改进	250
四、电路的设计与射极定时单稳态触发器的实用电路	253
第四节 基极定时多谐振荡器	260

一、电路的工作原理	260
二、电路输出波形的分析	264
三、电路的设计	267
四、电路的改进与基极定时多谐振荡器的实用电路	269
第五节 射极定时自激多谐振荡电路	274
一、电路的工作原理	275
二、电路输出波形的分析	279
三、射极定时多谐振荡器的设计	283
第六节 晶体管脉冲发生器	287
一、脉冲发生器的基本指标	288
二、脉冲发生器的工作原理	289

第五章 间歇振荡器

第一节 脉冲变压器	294
一、变压器的一般知识	294
二、脉冲变压器的特性	296
三、脉冲变压器的设计	301
附录 5-1-1 脉冲变压器等效电路的推导	304
附录 5-1-2 铁氧体磁性材料基本特性简介	305
第二节 单稳态间歇振荡器	308
一、电路的工作原理和输出波形的分析	308
二、间歇振荡器脉冲参数的计算	312
三、单稳态间歇振荡器的触发方式	317
四、单稳态间歇振荡器的设计	318
第三节 自激间歇振荡器	322
一、RC 定时自激间歇振荡器	322
二、二极管定时自激间歇振荡器	328

第六章 扫描电路

第一节 锯齿波电压发生器	331
一、概述	331
二、恒流源锯齿波电路	335
三、电容负反馈扫描电路	337
四、自举电路	344
五、快速扫描	354
第二节 锯齿波电流发生器	355

一、电感的“充电”过程	355
二、电流扫描发生器	358
三、电流扫描电路的改进	363
第三节 同步与分频	370
一、“同步”的基本原理	370
二、同步的实现	376
三、分频的实现	379
四、锁相分频	382
第四节 同步等幅扫描系统	385

第七章 特殊二极管及其应用

第一节 双基极二极管	399
一、双基极二极管的特性	399
二、双基极二极管的基本电路	402
三、双基极二极管的实用电路	407
第二节 隧道二极管	413
一、隧道二极管的特性	413
二、隧道二极管的基本电路	416
三、隧道二极管的实用电路	430
第三节 阶跃二极管和热载流子二极管及其应用	443
一、阶跃二极管及其应用	443
二、热载流子二极管	450

第一章 脉冲的基本知识

第一节 概 述

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”在半导体线路(放大、振荡、电源部分)一书中，我们介绍了有关半导体放大电路、振荡电路和电源等方面的知识，然而，这只是电子技术中的一部分，近几十年来，电子技术的另一重要课题——“脉冲技术”的研究得到了迅速的发展。它已广泛地应用在通讯、电视、雷达、电子计算机、遥控遥测和自动控制等各个领域，对于工、农业，国防科研等各方面都具有非常重大的意义。

“脉冲技术”所包含的内容是很丰富的，概括起来讲，主要有脉冲的变换、产生、放大和测量等等。在这一部分中，我们将着重于介绍前面两部分。

为了搞清楚到底什么是脉冲，先让我们看一个简单的电路。如图(1-1-1)(a)所示。设开关 K 原来是接通的，它将 R_2 短路，因此输出 $V_0=0$ 。当 $t=t_1$ 时，将开关 K 打开，则电源通过 R_1 、 R_2 形成回路。在 R_2 两端建立了一个电压，其值为：

$$V_0 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} = E'$$

在开关断开的期间 $t_1 \sim t_2$ ，一直维持此值。到 $t=t_2$ 时刻，如果将

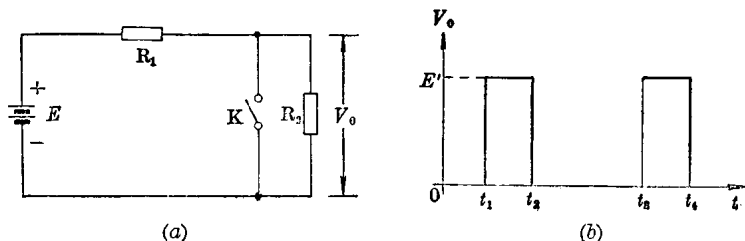
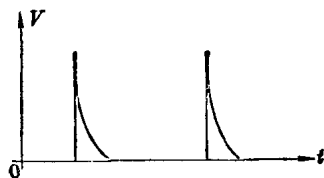


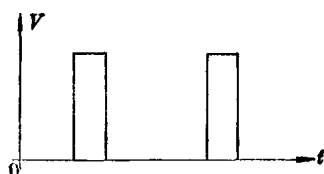
图 (1-1-1)

开关 K 再合上, 则 R_2 又将被短路, 其两端的电压 V_0 仍回到零。这样, 就在 R_2 两端得到一个如图 (1-1-1) (b) 所示的电压变化。反复接通和断开开关 K , 可以得到一系列断续的波形。这种波形, 我们称它为脉冲。

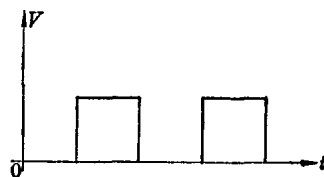
所谓脉冲, 就是在短时间内出现的电压或电流的变化。实际上, 在一般情况下, 凡按非正弦规律变化的电流或电压都泛称为脉冲。脉冲讯号的波形千变万化, 种类繁多, 图 (1-1-2) 给出了常见的几种脉冲波形。



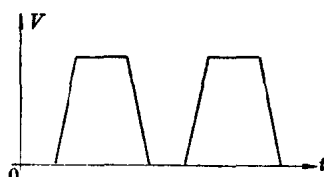
(a) 尖脉冲



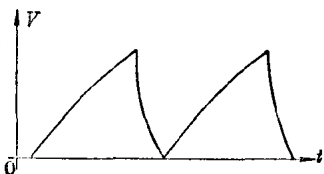
(b) 矩形脉冲



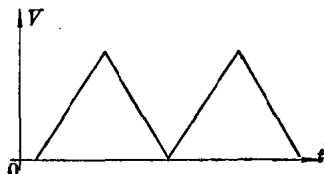
(c) 方波



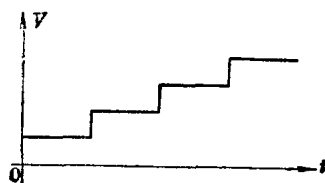
(d) 梯形波



(e) 锯齿波



(f) 三角波



(g) 阶梯波

图 (1-1-2)

对于正弦波, 只要用振幅、频率和相位等三个参数就可以进行全面的描述, 而对于脉冲波形则显然是不够的。一般, 常用以下几个参数来描写脉冲波形:

1. 脉冲幅度 V_m : 脉冲电压或电流从一种状态变化到另一种状态的跳变值, 如图 (1-1-3) 中所示的 V_m 。

2. 脉冲周期 T : 两个相邻脉冲重复出现所间隔的时间, 如图 (1-1-3) 中的 T 。周期的倒数即为脉冲的重复频率, $f = \frac{1}{T}$ 。

3. 脉冲上升时间 t_r : 脉冲电压或电流由 $0.1V_m$ (或初始值) 上升到 $0.9V_m$ 所需要的时间, 即上升时间, 用 t_r 表示, 如图 (1-1-3) 所示。 t_r 愈短, 表示脉冲上升得愈快。 t_r 在脉冲技术中是一个很重要的参数, 在很多电路中, 它往往是一个主要的技术指标。

4. 下降时间 t_f : 脉冲电压或电流由 $0.9V_m$ (或最大值) 下降到 $0.1V_m$ 所需要的时间。

5. 脉冲宽度 t_u : 脉冲宽度就是指脉冲出现后所持续的时间。它比较难作出严格的定义, 就以图 (1-1-3) 所示波形为例, 由于脉冲上升和下降需要时间, 因此一个脉冲波形的顶部和底部的宽度是不一样的。尤其象图 (1-1-2) (a) 所示的尖脉冲, 差别就更大。因此, 对于一般接近于矩形的脉冲, 宽度 t_u 比较明确; 对于顶和底部差别大的波形, 在定义宽度时, 应该指出所对应的幅度一般是指 $0.5V_m$ 处的宽度或底部宽度。

脉冲的波形虽然多种多样, 但是, 在半导体线路 (放大、振荡、电源部分) 一书的第三章第四节“宽带放大器”的附录中, 我们已用

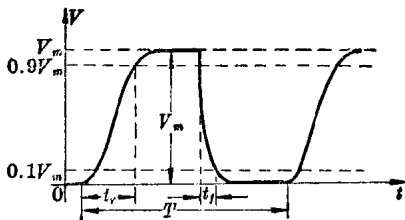


图 (1-1-3)

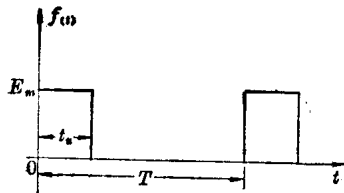


图 (1-1-4)

数学分析的方法证明，任何形状的脉冲讯号均可认为是由各种不同频率的正弦讯号，按照不同的振幅和相位迭加而成的。以图(1-1-4)所示的矩形脉冲为例，它们可以分解为：

$$f(t) = \frac{E_m t_u}{T} + \left(\frac{2E_m}{\pi} \sin \frac{\pi t_u}{T} \right) \cos \frac{2\pi}{T} t \\ + \left(\frac{E_m}{\pi} \sin \frac{2\pi t_u}{T} \right) \cos \frac{4\pi}{T} t \\ + \left(\frac{2E_m}{3\pi} \sin \frac{3\pi t_u}{T} \right) \cos \frac{6\pi}{T} t + \dots$$

式中： t_u 是脉冲宽度；

T 是脉冲周期。

上式表明：矩形波是由一直流分量和一系列频率分别为

$$\omega_n = n\omega_0 = n \frac{2\pi}{T}$$

的正弦波迭加而成的，各次谐波的振幅不同，并随着谐波次数的升高而逐渐减小。

上述概念对于我们分析脉冲过程是很有用处的，它把脉冲的暂态过程与我们很熟悉的稳态过程（正弦波通过电路的过程）联系起来。这样，就使得我们在很多场合下，可以用稳态的分析方法来分析脉冲过程。

在矩形脉冲中，其前、后沿电压（或电流）变化很快，它主要是由高次谐波分量迭加而成的，边沿越陡，所包含的高频分量的频率就越高。同样，在脉冲的平顶部分，电压（或电流）变化很慢，因此包含着低频分量，平顶越宽，所包含的频率就越低。在以后的分析过程中，这个概念是经常用到的。

通过实践我们将会知道，脉冲电路一般总是由电阻、电容、电感以及作为开关用的晶体管所组成的。因此，在我们学习各种具体的脉冲电路之前，必须对电阻、电感、电容所组成的电路在暂态情况下的特点和晶体管的开关特性有所了解。在本章中，我们就将介绍这方面的基本知识。

第二节 RC 电路和 RL 电路的暂态过程

一、 RC 电路的暂态过程

当我们用万用表来测量电阻和电容时,将会发现它们之间存在着这样的差别。用万用表测电阻时,表的指针很快就固定在一个位置上,而当用万用表来测大电容,刚一接上电容时,指针摆动很大,然后再渐渐地退回来。这说明在万用表与电容所构成的这一回路中,开始有一个很大的电流流过,然后,这个电流逐渐减小。这个现象显然是由电容本身的特性所决定的。

上述现象告诉我们:当电源与纯电阻组成的回路接通时,回路中立即产生一稳定电流,电路进入到新的稳定状态。但当电源与电阻、电容组成的回路接通时,回路中则将出现一个逐渐变化的暂态过程(亦称过渡过程),只有当暂态过程结束后,电路才达到新的稳定状态。下面,我们就来分析 RC 电路中出现的这一暂态过程的变化规律。

图(1-2-1)所示的 RC 串联电路,当我们将开关 K 打向“1”端时, RC 电路与电源 E 接通,电源通过

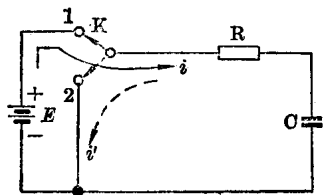


图 (1-2-1)

电阻 R 向电容 C 充电。电容 C 上逐渐积累起电荷。我们知道,电

容器两端的电压 V_c 与电容器上的电荷 Q 存在下列关系: $V_c = \frac{Q}{C}$ 。

在开关刚打向“1”的瞬间,由于电容器上电荷还来不及积累,因此,电容器上也就不能马上建立电压,这时电压 $V_c = 0$, 流过回路

的充电电流为 $i = \frac{E - V_c}{R} = \frac{E}{R}$, 我们又知道,电容器呈现出来的阻抗为 $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ 。在 $t \rightarrow 0$ 这一瞬间,电路中有 $i = \frac{E}{R}$ 的有限电

流流过,而电容两端的电压为零。由 $V_c = i \cdot Z_c$ 可知, $Z_c \rightarrow 0$, 但 $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ 中的 C 为一常数,所以必然是 $\omega \rightarrow \infty$ 。这就是说,电源

接通的那一瞬间($t \rightarrow 0$), 电容所表现出的特性与 $\omega \rightarrow \infty$ 的正弦讯号通过时所表现出来的特性相同, 因此脉冲的跳变与正弦波的 $\omega \rightarrow \infty$ 是相对应的。这个概念在以后的脉冲电路中常常会用到。

接着, 由于电容器上电荷不断积累, 电容器两端的电压将逐渐上升, 而充电电流 $i = \frac{E - V_c}{R}$ 则将随着 V_c 的上升而逐渐减小, 最后减小到零。因此, 电容器上电荷积累的速度是由快到慢的。电压 V_c 的上升速度也逐渐变慢, 最后经过很长的时间($t \rightarrow \infty$), 电压 $V_c = E$ 。整个电源电压全部降落在电容上。这时电容呈现出的阻抗为无穷大。根据 $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ 可知, $t \rightarrow \infty$ 与 $\omega \rightarrow 0$ 是相对应的。

那么, 电压 V_c 按照什么规律在变化呢? 为了解决这个问题, 首先应列出此电路的微分方程。由图(1-2-1)可以写出下式:

$$E = i \cdot R + V_c$$

将 $i = C \frac{dV_c}{dt}$ 代入上式, 得到:

$$E = RC \frac{dV_c}{dt} + V_c$$

解此微分方程, 即可得到:

$$V_c(t) = V_c(0) + [V_c(\infty) - V_c(0)](1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-2-1)$$

上式表明: RC 电路中电容两端的电压按指数规律变化。公式中, $V_c(0)$ 为 $t \rightarrow 0$ 时 V_c 的初始值, 对应于图(1-2-1)的 $V_c(0) = 0$; $V_c(\infty)$ 为 $t \rightarrow \infty$ 时 V_c 的极限值, 对应于图(1-2-1)的 $V_c(\infty) = E$; $\tau = RC$ 称为电路的时间常数。于是得:

$$V_c(t) = E(1 - e^{-t/RC})$$

同样, 可得充电电流的关系式:

$$i(t) = i(0)e^{-t/\tau} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} \quad (1-2-2)$$

根据(1-2-1)式和(1-2-2)式, 可以画出图(1-2-1)所示电路充电时的 V_c 和 i 的变化规律, 如图(1-2-2)所示。图中分别绘出了三条时间常数不同时的充电曲线。可以看出, 时间常数越大, 充电曲线上升的速度越慢。因此, 时间常数 RC 之值就表征了电路充

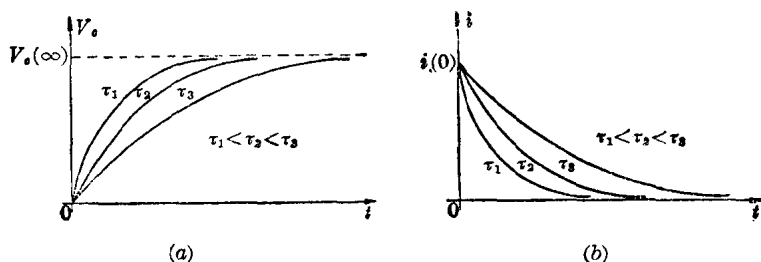


图 (1-2-2)

电的快慢。这点是不难理解的。因为 R 越大, 则充电电流越小, 充电过程就越慢; 同样, C 越大, 则电容器上所需要堆积的电荷就越多, 因此, 充足电荷所需的时间也越长。

为了更清楚地描述此指数曲线的变化规律, 我们选择了几个 t/RC 的数值, 求出对应的 $e^{-t/RC}$ 和 $(1-e^{-t/RC})$ 的数值, 列于表 (1-2-1)。

表 (1-2-1)

$\frac{t}{RC}$	0	0.69	1	2	3	5
$e^{-t/RC}$	1	0.5	0.37	0.14	0.05	0.007
$1-e^{-t/RC}$	0	0.5	0.63	0.86	0.95	0.993

可以看出, 虽然电容上电压充到 $V(\infty)$ 所需的时间是无穷大, 但是, 当 $t=3RC$ 时, V_c 已上升到 $0.95V(\infty)$ 。当 $t=5RC$ 时, V_c 已上升到 $0.99V(\infty)$ 。所以, 一般认为 $t=(3\sim 5)RC$ 时, 电容器上电荷已充足。

我们知道, RC 电路中电容 C 上的电压是按指数规律变化的, 而且可以根据 (1-2-1) 式定量地描述此指数曲线。对于任意的 RC 电路, 只要知道 $V_c(0)$ 、 $V_c(\infty)$ 和时间常数 τ , 则可以直接根据此式写出曲线的变化规律。下面举两个简单的例子。

【例 1】 试写出在图 (1-2-3) 所示的电路中, 加入一阶跃电压

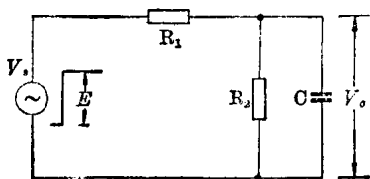


图 (1-2-3)

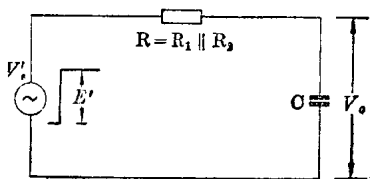


图 (1-2-4)

(所谓阶跃电压就是当 $t < 0$ 时, $V_s = 0$; $t \geq 0$ 时, $V_s = E$) 时, 电容器两端电压的变化规律。

根据(1-2-1)式, 关键在于正确地写出 $V_c(0)$ 、 $V_c(\infty)$ 和 τ 。

为了计算方便, 利用等效电源定理, 将图(1-2-3)等效成图(1-2-4), 其中:

$$R = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E' = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

这时, 可以写出:

$$V_c(0) = 0; \quad V_c(\infty) = E' = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\tau = R \cdot C = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$$

以此代入(1-2-1)式, 则得:

$$V_c(t) = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} [1 - e^{-t(R_1 + R_2)/R_1 R_2 C}]$$

【例 2】 试写出在图(1-2-5)所示的电路中加入阶跃电压后,

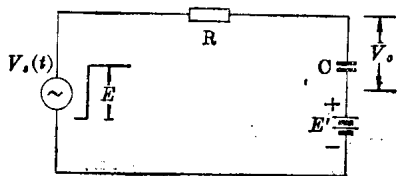


图 (1-2-5)

电容两端电压 V_c 的变化规律。

在此电路中, 由于除了讯号源 $V_s(t)$ 之外, 还有一电源 E' 接入。因此, 在 $t \leq 0$ 时, 虽然 $V_s = 0$, 但由于 E' 的存在, 电容上已有一个初始的电荷堆积,

也就是说, 电容上电压的初始值不为 0。显然, $V_c(0) = -E'$; $V_c(\infty) = E - E'$; $\tau = RC$, 于是根据(1-2-1)式可以写出: