

А. И. ГОМОНОВА, Л. Н. КУЛУМБЕТОВА, К. Я. СЕНАТОРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНОЙ СХЕМЫ НА ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОМ P-N-P-N ДИОДЕ

Проведен анализ физических процессов в триггерной схеме на P-N-P-N диоде при работе со счетным запуском. Определены области устойчивого деления.

Показана возможность счетного запуска последующего каскада предыдущим. Проведено сопоставление теоретических расчетов с экспериментом.

Введение

В настоящее время освоено производство новых полупроводниковых приборов — четырехслойных диодов, которые начинают широко внедряться в практику. Четырехслойный диод является двухвыводным полупроводниковым прибором, представляющим собой монокристаллическую структуру, состоящую из четырех чередующихся областей p- и n-типа.

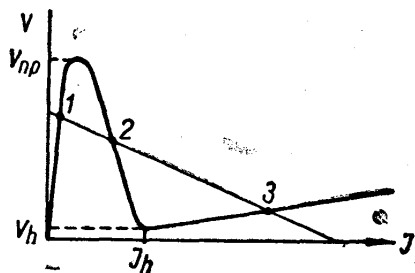


Рис. 1. Вольтамперная характеристика четырехслойного диода

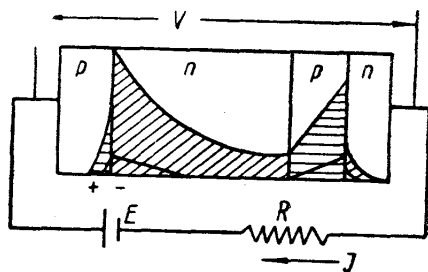


Рис. 2. Распределение зарядов неосновных носителей в четырех-слойном диоде в запертом и открытом состоянии

Особенность этих приборов в том, что они обладают вольтамперными характеристиками N-типа, имеющими участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Связь вида вольтамперных характеристик с процессами, происходящими в диодах, подробно рассмотрена в статьях [1, 2, 3, 4]. Примерный вид вольтамперной характеристики и схематическое изображение хода концентрации неосновных носителей в базах в запертом и открытом состояниях показаны на рис. 1 и 2.

При соответствующих условиях $P-N-P-N$ диод может служить активным элементом в схемах. В связи с этим основными областями его применения являются усиление, генерирование и преобразование колебаний. Некоторые применения приборов для этих целей описаны в работах [1, 2, 3, 5].

Наличие у $P-N-P-N$ диодов вольтамперной характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления и инерционных свойств, связанных с режимом насыщения, дает возможность осуществить простую по конструкции триггерную схему, работающую в режиме счетного запуска.

Данная статья посвящена анализу физических процессов в такой схеме, выяснению их связи с процессами, происходящими в самом четырехслойном диоде.

Качественное описание процессов в триггере

Схема предлагаемого триггера, работающего в режиме счетного запуска, приведена на рис. 3. Счетный запуск в схеме осуществляется благодаря особому механизму работы, использующему инерционные свойства четырехслойного диода, обусловленные накоплением и рассасыванием заряда неосновных носителей в базах.

Диод и конденсатор в схеме играют роль элементов, накапливающих заряды, соотношение которых при переходных процессах определяет будущее состояние в системе. Таким образом, для анализа устойчивости этих состояний нельзя пользоваться вольтамперной характеристикой, определяющей статический режим прибора, а необходимо рассматривать течение переходных процессов.

Сначала рассмотрим качественно процессы, происходящие в системе, изображенной на рис. 3. Эпюры напряжения на емкости и тока через диод приведены на рис. 4. Рассмотрение удобно начать, когда диод заперт, а конденсатор заряжен почти до напряжения источника, так как сопротивление диода в запертом состоянии велико, достигает десятков мегом (см. рис. 1). Это устойчивое состояние может существовать неограниченно долго вплоть до прихода пускового импульса.

Для запуска схемы необходимо, чтобы сумма напряжения на емкости и амплитуды напряжения пускового импульса оказалась достаточной для отпираания диода. С приходом такого импульса диод открывается (сопротивление его уменьшается до сотен или десятков ом) и протекающий через диод ток перезаряда емкости накапливает в его базах большое количество заряда неосновных носителей. За время действия пускового импульса конденсатор перезаряжается до некоторого отрицательного относительно земли напряжения, зависящего от амплитуды, длительности импульса и постоянной времени цепи перезаряда емкости. Таким образом, в момент прекращения импульса к диоду приложено напряжение обратной полярности и накопившийся в его базах заряд неосновных носителей, обеспечивающий режим насыщения, частично рекомбинирует, а частично «вытекает». Этот процесс протекает очень похоже на известные процессы в диодах и триодах, описанные в литературе [6, 7, 8, 9]. Анализ переходного процесса выключения четырехслойной структуры при приложении постоянного обратного напряжения дан в работе Беккера [10].

В нашем случае «вытекание» происходит под действием напряжения, зависящего от времени, с учетом сопротивления в цепи перезаряда емкости. Величина заряда, остающегося в базах после «вытекания», определяет дальнейшее состояние диода. Если эта величина $Q_{ост1}$ больше

некоторой минимальной величины заряда $Q_{\text{нас min}}$, способного поддерживать диод в состоянии насыщения, т. е. $Q_{\text{ост 1}} > Q_{\text{н. min}}$, то диод остается открытым. Величина заряда при этом стремится к значению, определяемому стационарным режимом. На вольтамперной характеристике рис. 1 это соответствует устойчивому положению 3, в котором диод находится до прихода следующего импульса. $Q_{\text{нас min}}$ — это минимальный заряд, соответствующий току I_h на вольтамперной характеристике рис. 1.

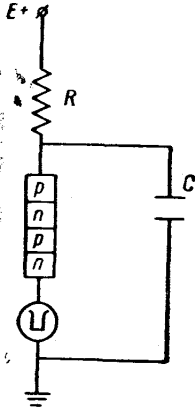


Рис. 3. Схема триггерной ячейки, работающей в режиме счетного запуска

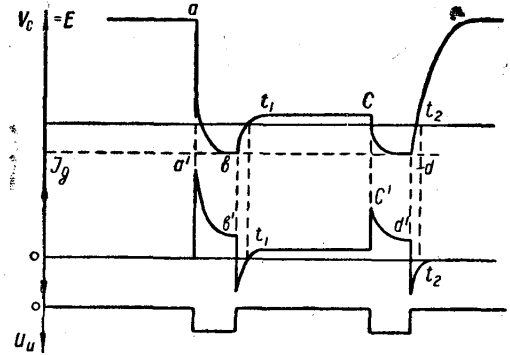


Рис. 4. Эпюры напряжения на емкости и токов через диод в триггерной схеме

С приходом следующего импульса в системе протекают те же самые процессы, что и при первом импульсе, однако с той разницей, что в базах накапливается неосновных носителей намного меньше, так как начальное напряжение на конденсаторе в этом случае существенно меньше (на рис. 4 точки C и C'). Поэтому за время, когда к диоду приложено обратное напряжение, неосновные носители успевают «вытечь» и частично рекомбинировать, в результате чего состояние насыщения исчезнет и диод закроется. Если же к концу момента «вытекания» в базах диода остается заряд, то для запирания необходимо, чтобы его величина была

$$Q_{\text{ост 2}} < Q_{\text{н. min}}$$

Таким образом, два следующих друг за другом запускающих импульса играют в системе разную роль: один отпирает диод и оставляет его открытым, другой — запирает, благодаря чему система работает в режиме счетного запуска.

Форма импульсов на выходе триггера определяется постоянными времени перезаряда конденсатора: передний фронт — постоянной времени RC , задний — постоянной времени rC , где R — сопротивление нагрузки, r — сумма сопротивлений открытого диода и генератора импульсов (см. рис. 3).

Расчет процессов в схеме

Проведенный качественный анализ позволяет нам формально разбить весь процесс для рассмотрения на 4 этапа. На каждом этапе составляется уравнение непрерывности для зарядов в базах (1) и система уравнений Кирхгофа (2) с соответствующими начальными и граничными условиями. В общем случае уравнения нелинейны и решение задачи со-

пряжено с математическими трудностями. Для упрощения задачи сделаем следующие предположения.

1. Четырехслойный диод считается симметричным.
2. Рассматривается одномерная модель диода.
3. Коэффициенты инжекции крайних переходов во включенном состоянии равны 1, поскольку для существующих образцов четырехслойных диодов и триодов крайние области сильно легированы, и концентрация примесей в них отличается от концентрации в базовых областях на 1, 2 порядка.
4. Эффективное время жизни неосновных носителей не зависит от режима работы диода.

Эти предположения используются в литературе [1, 4, 10, 12].

5. Сопротивление диода в запертом состоянии полагается бесконечно большим (см. рис. 1), а в открытом состоянии выбирается некоторая средняя арифметическая величина между сопротивлением диода в статическом режиме, определяемом вольтамперной характеристикой, и сопротивлением диода с учетом сильной модуляции баз, которая имеет место при протекании токов разряда конденсатора. Такое приближение вполне допустимо, поскольку последовательно с открытым диодом стоит значительное сопротивление генератора импульсов.

6. При переходе диода из запертого состояния в открытое сопротивление его меняется скачком.

Все эти предположения позволяют на каждом этапе решать линейную систему уравнений, сопрягая решения на границах этапов.

Остановимся еще на одном явлении, которое качественно не влияет на характер процесса, но должно быть учтено при количественном рассмотрении. Запертый диод с приходом пускового импульса отпирается не сразу, а через некоторое время τ_3 , которое иногда называют «временем задержки» (12). Эта задержка связана с тем, что состояние насыщения в диоде наступает только тогда, когда в базах накапливается некоторое количество заряда $Q_{н. \min}$. Это накопление происходит в течение времени τ_3 . В данной работе величина τ_3 определялась опытным путем.

Уравнение сохранения заряда в базах для каждого этапа имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau_{ж}} + I_6(t), \quad (1)$$

а система уравнений Кирхгофа

$$\begin{aligned} E + U &= IR + I_{др}, \\ U &= I_{др}r - U_{c0} + \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt \\ I + I_c &= I_{др}. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнении (1) $Q = q \int (p - p_n) dv$ — избыточный заряд носителей одного знака в базе, $\tau_{ж}$ — эффективное время жизни носителей, I_6 — ток базы, определяемый как разность токов основных носителей через переходы, ограничивающие базу. Для правой p -базы (рис. 2) базовым током является ток дырок $\alpha_1 I_{др}$ из левой базы, аналогично для левой n -базы — ток электронов $\alpha_2 I_{др}$. В свою очередь $I_{др}$ — ток, протекающий через диод. Так как в данных приборах n -база в несколько раз (примерно в 10 раз) шире p -базы, то $\alpha_1 \ll \alpha_2$, где α_1 и α_2 — коэффициенты усиления по току для $P-N-P$ и $N-P-N$ триодов, составляющих четырехслойную структуру. При протекании тока через диод в обратном направлении базовый ток

определяется как $(1-\gamma)I_{д.н.}$, где γ — коэффициент инжекции центрального перехода, не равный 1.

Решение уравнения для заряда (1) при любых токах базы $I_0(t)$ с начальным условием $Q(t=0) = Q_0$ имеет вид [11]

$$Q(t) = \left[Q_0 + \int_0^t I_0(t) e^{\frac{t}{\tau_{ж}}} dt \right] e^{-\frac{t}{\tau_{ж}}}, \quad (3)$$

Строго говоря, заряды надо находить для обеих баз диода, но сравнение выражений для заряда в двух базах, полученных с помощью формулы (3), показывает, что заряд в широкой базе больше, чем в узкой. Следовательно, состояние диода будет определяться зарядом в широкой базе. Выражения для зарядов на каждом этапе имеют следующий вид:

$$Q_1(\tau_{и}) = (E + U)(1 - \alpha_1) \left[\frac{\tau_{ж}}{R} (1 - e^{-\frac{\tau_{и} - \tau_3}{\tau_{ж}}}) + \frac{e^{-\frac{t_{и} - \tau_3}{rc}} - e^{-\frac{\tau_{и} - \tau_3}{\tau_{ж}}}}{r \left(\frac{1}{\tau_{ж}} - \frac{1}{rc} \right)} \right],$$

$$Q_2(t_1) = Q_1(\tau_{и}) e^{-\frac{t_1}{\tau_{ж}}} + (1 - \gamma) \frac{E \tau_{ж}}{R} (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_{ж}}}) - \frac{(1 - \gamma) [(E + U) (1 - e^{-\frac{\tau_{и} - \tau_3}{rc}}) - E]}{r \left(\frac{1}{\tau_{ж}} - \frac{1}{rc} \right)} (e^{-\frac{t_1}{rc}} - e^{-\frac{t_1}{\tau_{ж}}}), \quad (4)$$

$$Q_3(\tau_{и}) = (1 - \alpha_1) \frac{\tau_{ж} E}{R} e^{-\frac{\tau_{и}}{\tau_{ж}}} + (1 - \alpha_1) \frac{(E + U) \tau_{ж}}{R} (1 - e^{-\frac{\tau_{и}}{\tau_{ж}}}) + \frac{U(1 - \alpha_1) (e^{-\frac{\tau_{и}}{rc}} - e^{-\frac{\tau_{и}}{\tau_{ж}}})}{r \left(\frac{1}{\tau_{ж}} - \frac{1}{rc} \right)},$$

$$Q_4(t_2) = Q_3(\tau_{и}) e^{-\frac{t_2}{\tau_{ж}}} + (1 - \gamma) \frac{E \tau_{ж}}{R} (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_{ж}}}) - \frac{(1 - \gamma) U (e^{-\frac{t_2}{rc}} - e^{-\frac{t_2}{\tau_{ж}}})}{r \left(\frac{1}{\tau_{ж}} - \frac{1}{rc} \right)},$$

где E — напряжение источника питания, U — напряжение пускового импульса, $\tau_{и}$ — длительность пускового импульса, t_1 и t_2 соответственно — моменты окончания второго и четвертого этапов (см. рис.4). t_1 и t_2 — определяются из условия, когда ток, протекающий через диод в обратном направлении, проходит через нуль. Как было указано выше, для работы триггера в режиме счетного запуска необходимо, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$\begin{aligned} Q_2(t_1) &> Q_{н. \min.} \\ Q_4(t_2) &< Q_{н. \min.} \end{aligned} \quad (5)$$

Для широкой базы $Q_{н.мин} = \alpha_2 I_h \tau_{ж}$ на основании формулы для заряда в базе в статическом режиме. I_h — определяется из вольтамперной характеристики (см. рис. 1).

В левые части неравенств входят параметры схемы и пускового импульса, следовательно, схема может работать в режиме счетного запуска в ограниченной области изменения амплитуды, длительности пускового импульса, величины емкости и других параметров, удовлетворяющих этим неравенствам.

Экспериментально снятые области работы триггера в режиме счетного запуска в зависимости от различных параметров приведены на рис. 5. Построенные в тех же координатах теоретические области деления из неравенств (5) приведены на рис. 6. Расчет теоретических областей проведен для следующих условий: $\alpha_2 = 0,8$; $\alpha_1 = 0,2$; $\gamma = 0,8$; $\tau_{ж} = 1$ мксек; $E = 200$ в; $R = 10$ ом; $r = 800$ ом; расчет проведен для двух значений емкостей $C = 300$ пик и $C = 2000$ пик. Как видно, характер изменения экспериментально и теоретически полученных границ областей деления качественно хорошо согласуется. Области сужаются с увеличением $\tau_{и}$. Увеличение $\tau_{и}$ ведет к тому, что за время действия импульса успевает рекомбинировать значительная часть заряда и к концу двух следующих друг за другом импульсов разница в зарядах уменьшается. Поэтому неравенства (5) выполняются в меньших пределах.

Для количественной оценки теоретически полученных соотношений (5) определялись все значения величин параметров для нескольких точек (шести) внутри области деления и вычислялись заряды в базах; проверялось выполнение соотношений (5). Результаты расчетов приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, соотношения (5) хорошо выполняются. Наблюдаемые в двух случаях отклонения для малых $\tau_{и}$ можно объяснить тем, что величины времени жизни, коэффициентов усиления α_1 и α_2 не были известны достаточно точно. Изготовителем четырехслойных структур были сообщены некоторые средние величины: эффективное время жизни для $\tau_{ж} = 1$ мксек; $\alpha_1 = 0,2$, $\alpha_2 = 0,8$. Кроме того, при теоретическом расчете мы допускали ряд предположений, упомянутых выше, которые могут не всегда строго выполняться. (Например, предположение о симметрии четырехслойного диода, о постоянстве времени жизни.) Помимо того, неизбежны неточности, возникающие от усреднения сопротивления диода.

Экспериментально изучалось также влияние нагрузки. Типичным вариантом нагрузки является вход аналогичного триггера, работающего в счетчике. Если подключить следующий каскад через RC дифференцирующую цепочку, то при подходящем выборе ее параметров продифференцированные импульсы, соответствующие задним крутым фронтам импульсов, снятых с триггера, могут служить запускающими для следующего каскада.

Экспериментально наблюдалась работа трех каскадов. Устойчивая работа схемы наблюдалась нами при изменении амплитуд запускающего импульса от $5 \div 10$ в до 125 в, при этом величины емкостей и длительностей импульсов менялись согласно рис. 5. Амплитуда напряжения на выходе триггера определяется величиной постоянного напряжения источника, которое выбирается близким к напряжению пробоя (см. рис. 1) для данного диода и меняется для различных диодов от десятков до сотен вольт. Как уже упоминалось, передний фронт выходного импульса определяется постоянной времени RC и может меняться в очень широких пределах, задний фронт импульса в основном определяется лавинным пробоем и может быть меньше $0,02$ мксек.

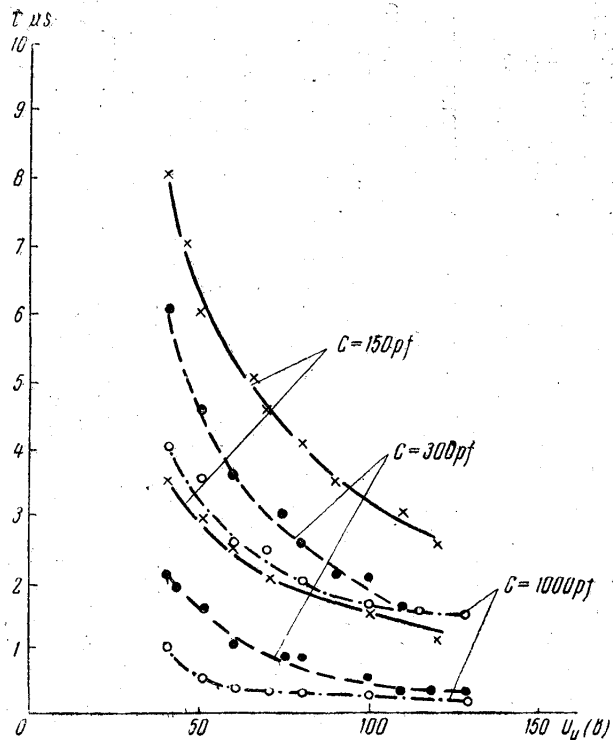


Рис. 5. Экспериментальные области работы триггера в режиме счетного запуска

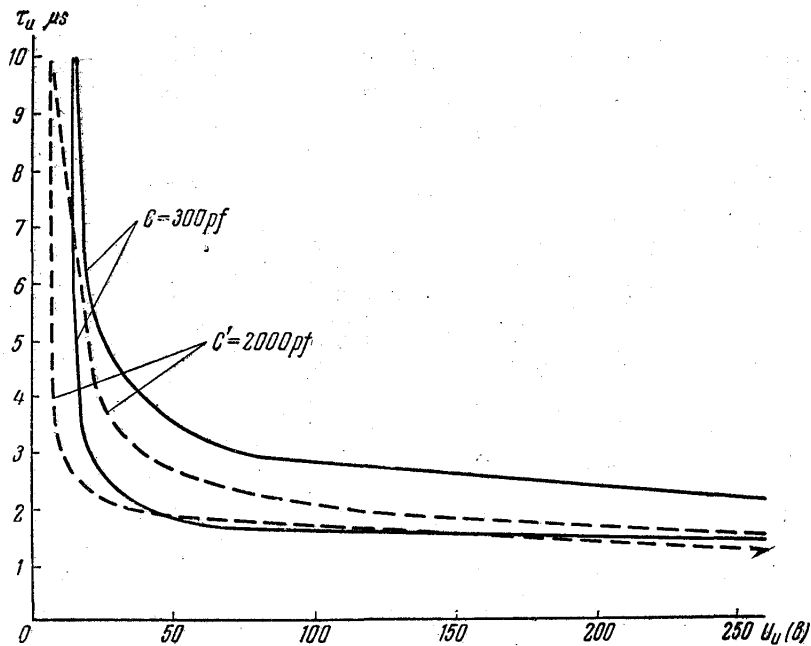


Рис. 6. Теоретические области работы триггера в режиме счетного запуска

Таблица 1

C = 150 пик				C = 300 пик			C = 1000 пик		
U_H	$Q_2(t_1) \kappa$	τ_H мксек	$Q_4(t_2) \kappa$	$Q_2(t_1) \kappa$	τ_H	$Q_4(t_2) \kappa$	$Q_2(t_1) \kappa$	τ_H	$Q_4(t_2) \kappa$
40 в	$0,79 \cdot 10^{-9}$	5,5	$0,56 \cdot 10^{-9}$	$4,4 \cdot 10^{-9}$	3	$-0,06 \cdot 10^{-9}$	$27,16 \cdot 10^{-9}$	3,5	$-0,935 \cdot 10^{-9}$
50 в	$0,91 \cdot 10^{-9}$	4,5	$0,4 \cdot 10^{-9}$	$6,094 \cdot 10^{-9}$	2,5	$-0,186 \cdot 10^{-9}$	$19,87 \cdot 10^{-9}$	3	$-1,024 \cdot 10^{-9}$
60 в	$0,97 \cdot 10^{-9}$	4	$0,27 \cdot 10^{-9}$	$4,68 \cdot 10^{-9}$	2	$-0,13 \cdot 10^{-9}$	$10,8 \cdot 10^{-9}$	2,5	$0,34 \cdot 10^{-9}$
70 в	$1,23 \cdot 10^{-9}$	3,5	$0,18 \cdot 10^{-9}$	$8,07 \cdot 10^{-9}$	1,5	$0,156 \cdot 10^{-9}$	$12,14 \cdot 10^{-9}$	2	$-0,26 \cdot 10^{-9}$
80 в	$1,63 \cdot 10^{-9}$	3	$0,172 \cdot 10^{-9}$	$10,7 \cdot 10^{-9}$	1,5	$0,89 \cdot 10^{-9}$	$49,69 \cdot 10^{-9}$	1,5	$-0,59 \cdot 10^{-9}$
100 в	$2,6 \cdot 10^{-9}$	2,5	$0,176 \cdot 10^{-9}$	$16,43 \cdot 10^{-9}$	1	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$6,81 \cdot 10^{-9}$	1	$-0,62 \cdot 10^{-9}$

$$Q_H \cdot \min = \sigma_z J_H \tau_{жк} = 0,64 \cdot 10^{-9} \kappa$$

Как уже указывалось, принцип действия схемы основан на использовании инерционности диодов, как положительного свойства, хотя, с другой стороны, инерционность сама по себе ограничивает быстродействие схемы. На использованных в работе опытных образцах деление наблюдалось в диапазоне частот до ста килоггерц. Можно предполагать, что более совершенная технология изготовления расширит частотный предел применения этих диодов.

Выводы

Предложена простая схема триггера на $P-N-P-N$ диоде для работы в режиме счетного запуска. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с хорошо известной схемой триггера на двух полупроводниковых триодах: а) наличие только одного активного элемента; б) одного источника питания; в) счетный запуск осуществляется без дополнительных элементов; г) одинаково простой запуск импульсами любой полярности; д) большая амплитуда напряжения на выходе триггера.

Рассмотрена теоретическая задача о «вытекании» носителей заряда из баз под действием зависящего от времени обратного напряжения, приложенного к диоду; выявлено существование ограниченных областей деления, что подтверждается экспериментом. Экспериментально изучено влияние параметров схемы и пускового импульса на работу триггера. Исследовано влияние нагрузки и выявлена возможность последовательного запуска каскадов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moll J. L., Tanenbaum M., Goldey L. M., Holonyak N. Proc. IRE. 44, September, 1174, 1956.
2. Shockley W. Electronic Industry, No. 8, 1957.
3. Shockley W. Gibbons Semiconductor Products, Jan/Feb, 9, 1958.
4. Mackintosh I. M. Proc. IRE. 46, June, 1229, 1958.
5. Harden M. Communic and Electronics, No. 40, January, 1959.
6. Kingston R. H. Proc. IRE, 42, No. 5. 829, 1954.
7. Lax B., Heustadter S. F. J. Appl. Phys., 25, No. 9, 1148, 1954.
8. Steel E. L. J. Appl. Phys., 25, July, 916, 1954.
9. Барсуков Ю. К. «Физика твердого тела», № 6, 860, 1959.
10. Baker A. N., Goldey J. M., Röss I. M. Wescon Convention Record, pt. 3. 43—48, 1959.
11. Кузьмин В. А., Виноградов Б. Н. «Радиотехника и электроника», 5, № 3, 490, 1960.
12. Misawa T. J. of Electronics and Control, No. 6, 523, 1959.

Поступила в редакцию
21. 4 1961 г.

Кафедра
теории колебаний