

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗОГРЕВА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В диапазоне длин волн 0,1-10 мм, который в последнее время интенсивно осваивается, перспективным способом управления излучением представляется использование взаимодействия излучения с полупроводниковой плазмой, так как в этом диапазоне именно параметры газа свободных электронов определяют, в основном, оптические свойства полупроводника [1].

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости записывается в виде [1]:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon_L \left( 1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} \right); \\ \epsilon_2 &= \frac{\epsilon_L}{\omega\tau} \left( \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\omega_{pl} = \left( (4\pi N e^2) / (m^* \epsilon_L) \right)^{\frac{1}{2}} - \text{плазменная частота};$$

$$\tau = \frac{m^* \mu}{e} - \text{время релаксации импульса};$$

$\epsilon_L$  - статическая диэлектрическая проницаемость.

При подстановке выражений (1) в формулы Френеля (2) получаются явные выражения для зависимости коэффициентов отражения  $R_s$  и  $R_p$  от  $\omega$ ,  $\omega_{pl}$  и  $\tau$ . Изменяя параметры  $\omega_{pl}$  и  $\tau$ , можно изменять коэффициенты отражения и таким образом управлять излучением.

На рис. 1 в координатах  $\omega_{pl} \omega^{-1}$  и  $(\omega\tau)^{-1}$  приведен график семейства изолиний равного коэффициента отражения  $R_s$ . Движению параллельно оси ординат соответствует изменение  $\tau$  при фиксированных  $\omega$  и  $\omega_{pl}$ . Особый интерес представляет собой движение вдоль пунктирной линии вблизи плазменного резонанса. Видно, что коэффициент отражения немонотонно зависит от времени релаксации. Так как время релаксации зависит от напряженности поля однозначно, то при определенных пределах изменения внешнего поля коэффициент отражения будет изменяться также немонотонно. Если внешним полем является поле самой волны, то возможно появление четных гармоник излучения. Особенностью генерации таких гармоник является то, что эффективность их генерации имеет резонансный характер по интенсивности.

Время релаксации определяется взаимодействием носителей с нерегулярностями решетки и записывается в виде [3]:

$$\tau^{-1} = \sum_n \tau_n^{-1}; \quad \tau_n = A_n T^{p_n} \left( \frac{T_e}{T} \right)^{g_n}, \quad (2)$$

где

$T_e$  - температура носителей;  $T$  - температура решетки;

параметры  $p_n$  и  $g_n$  в зависимости от механизма рассеяния принимают значения от  $-\frac{1}{2}$  до  $\frac{3}{2}$ ;

$A_n$  - коэффициент, который зависит от  $T$  не сильнее, чем  $\ln$ .

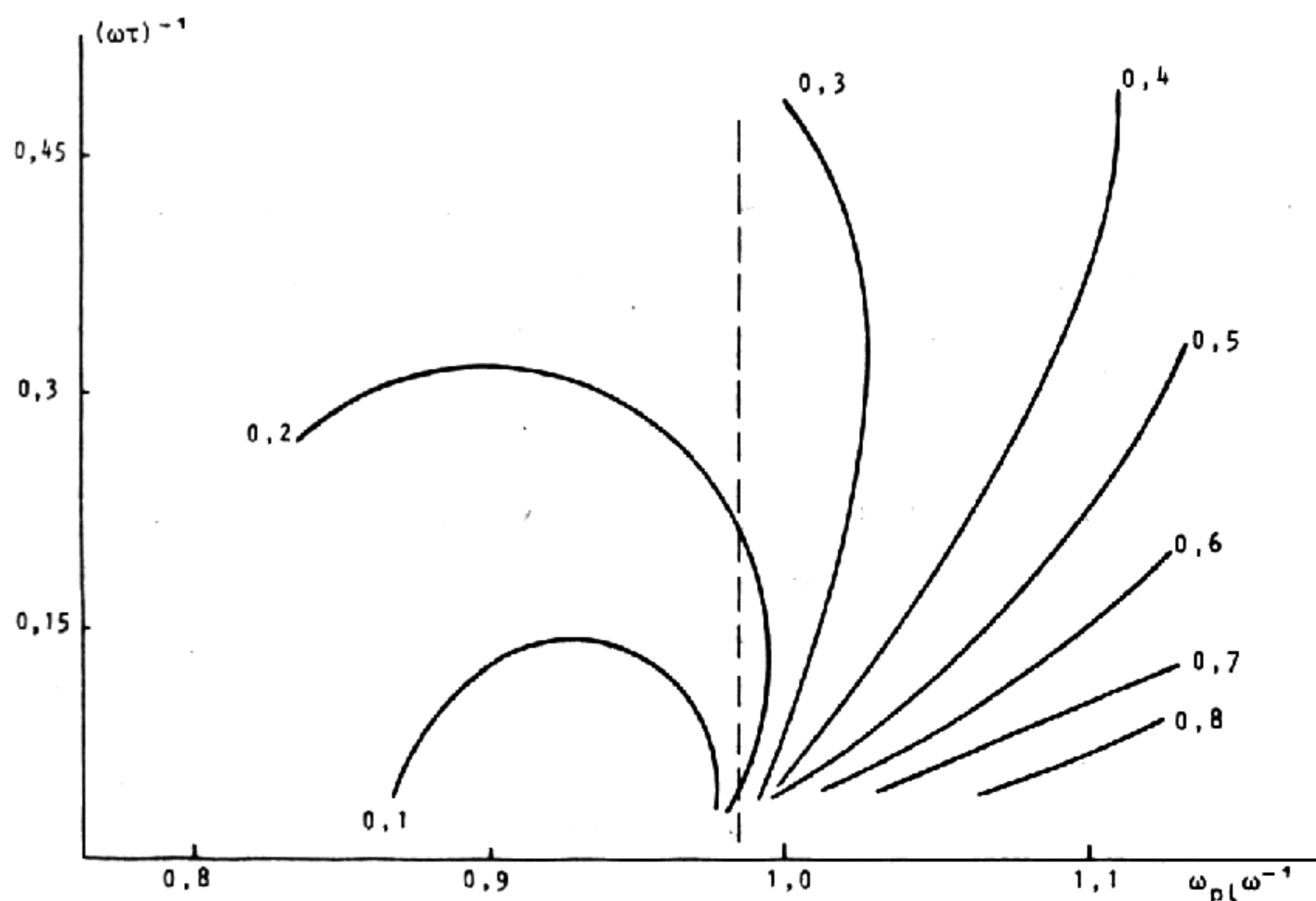


Рис. 1. Изолинии равного коэффициента отражения при  $\epsilon_L = 12,5$  и угле падения  $30^\circ$ . Численное значение коэффициента отражения указано у каждой кривой

Вообще говоря, температура носителей может отличаться от температуры решетки. Это может произойти в случае, когда внешнее воздействие обеспечивает практически полную передачу энергии подсистеме носителей. На практике к разогреву носителей могут приводить инжекция, облучение излучением с энергией кванта, превышающей энергию запрещенной зоны, внешнее электрическое поле. Методы, использующие инжекцию и облучение, описаны в [4-6].

Были проведены эксперименты по проверке возможности использования разогрева носителей электрическим полем для управления излучением. Излучение с длиной волны 4,3 мкм посредством системы диэлектрических волноводов пропускалось через полупроводниковый образец. Образцы представляли собой пластины из кремния и арсенида галлия различных проводимостей и степеней легирования. Размеры пластин порядка  $8 \times 8 \times 0,1$  мм; на их края были нанесены омические контакты. Начальное пропускание составляло несколько десятков процентов.

К образцу прикладывалось управляющее напряжение в форме периодической последовательности прямоугольных импульсов различной длительности и амплитуды. Проходящее излучение принималось детектором, сигнал с которого подавался либо на осциллограф, либо на синхронный детектор, используемый для обнаружения малых изменений сигнала.

На рис. 2 показаны осциллограммы импульса пропускания при различных его длительностях. При достаточно малых длительностях форма импульса пропускания близка к прямоугольной, то есть совпадает с формой управляющего импульса. При больших длительностях начинает сказываться влияние нагрева решетки, который прямо пропорционален полученной энергии. Так как коэффициент пропускания зависит также и от температуры решетки, это приводит к отклонению формы импульса от прямоугольной. В осциллограммах, представленных на рис. 2, нагрев носителей приводит к уменьшению пропускания, а нагрев решетки - к его увеличению.

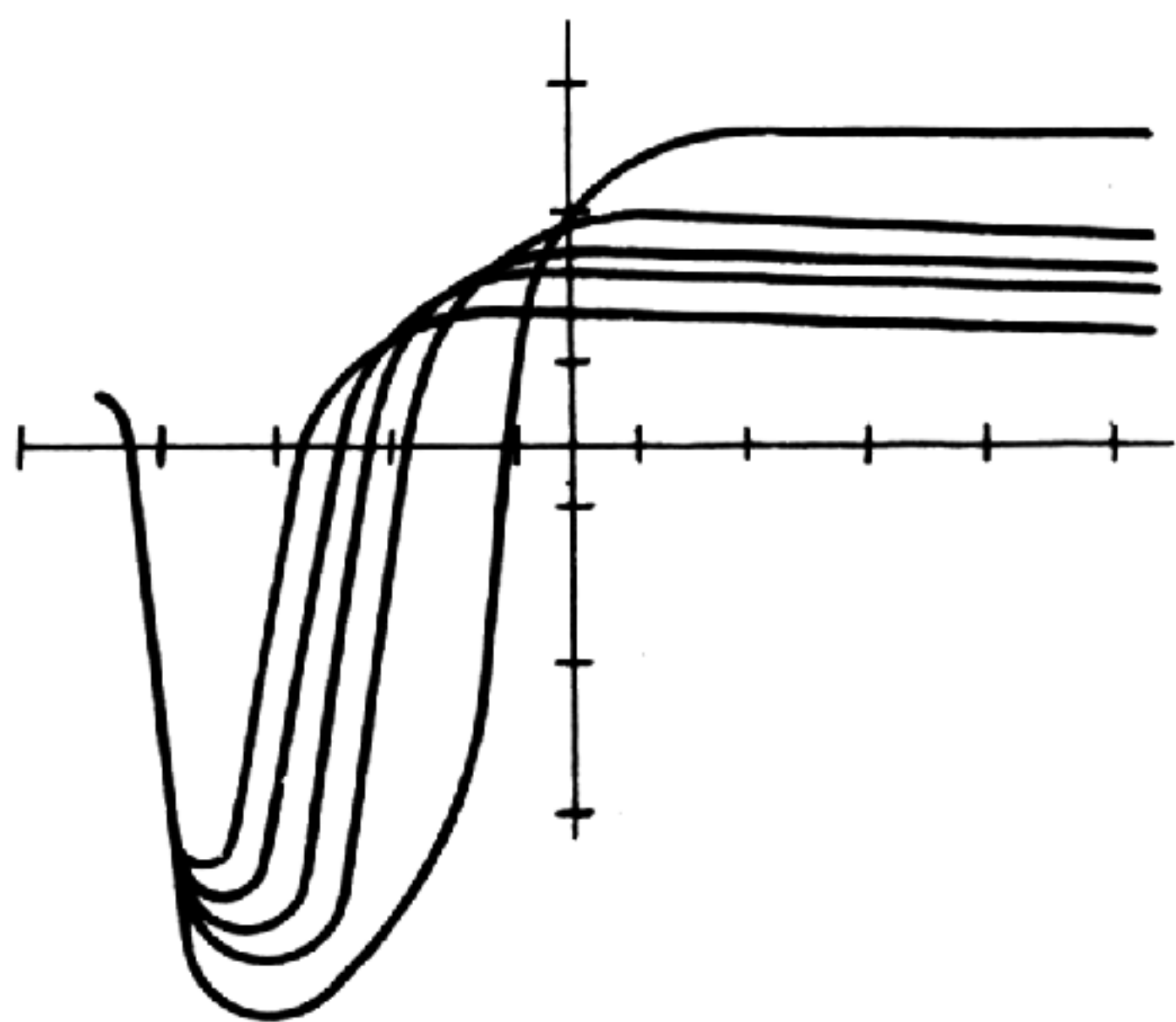


Рис. 2. Осциллограммы проходящих импульсов при длительности управляющих импульсов 40, 50, 60, 70, 120 мкс для n-Si

ном из образцов 12% при напряженности поля 500 В/см. На рис. 4 изображена зависимость глубины модуляции от длительности импульса. Наклон этой зависимости обусловлен разогревом решетки, температура которой прямо пропорциональна длительности импульса.

Проведенные эксперименты подтверждают возможность управления оптическими характеристиками полупроводника путем разогрева носителей импульсами тока. Это позволяет надеяться на создание относительно простых устройств управления излучением в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента пропускания от напряженности поля при постоянной длительности импульса для случая, когда нагрев и носителей и решетки приводит к увеличению пропускания. Кривая на этом графике в первом приближении аппроксимируется суммой прямой и параболы, что может быть объяснено из следующих соображений. Температура носителей, а следовательно, и ее вклад в коэффициент пропускания линейно зависят от напряженности поля, в то время как температура решетки и ее вклад прямо пропорционален джоулеву теплу, которое, в свою очередь, зависит от напряженности поля квадратично. Максимальная глубина модуляции составила на од-

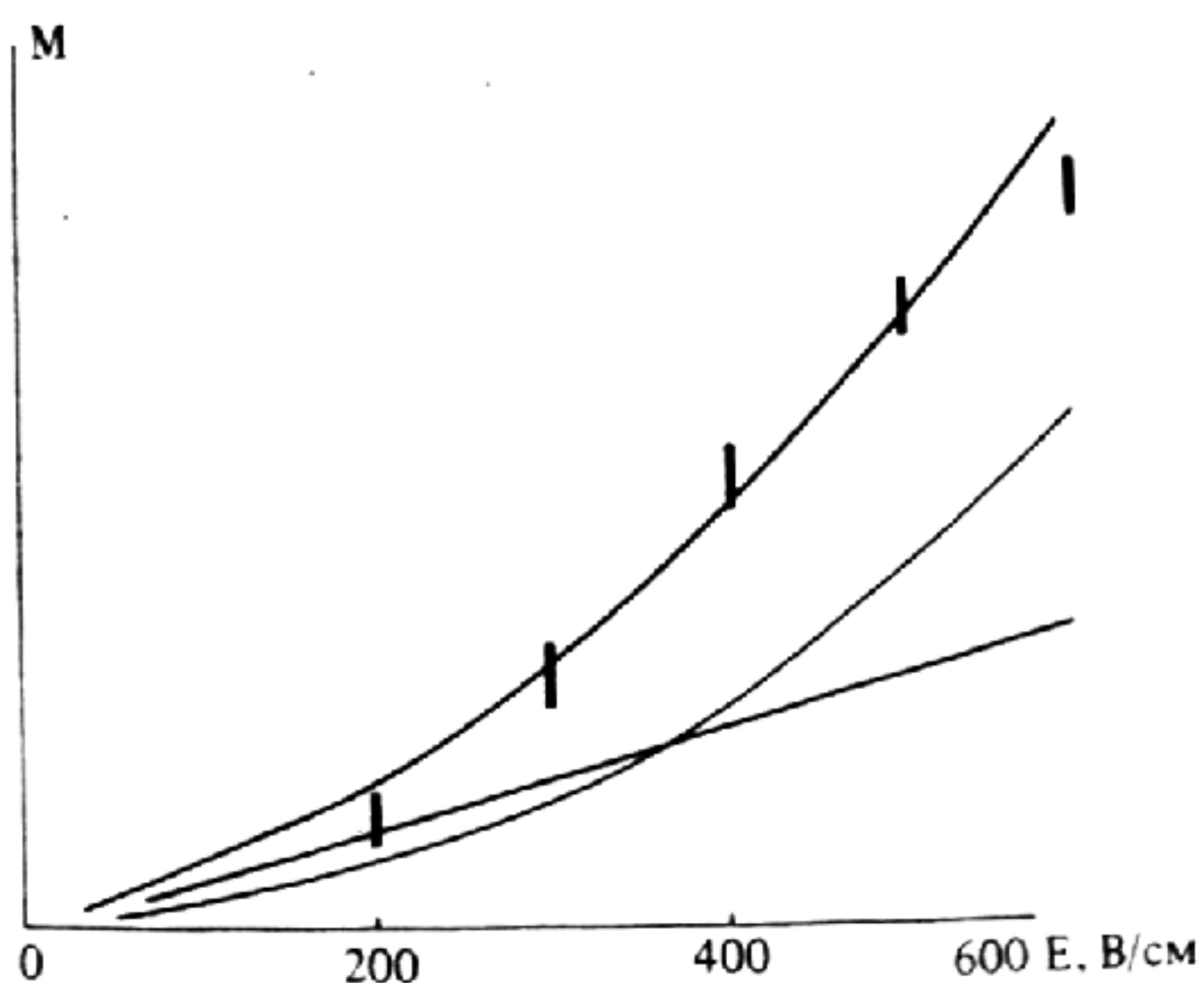


Рис. 3. Зависимость глубины модуляции от напряженности поля

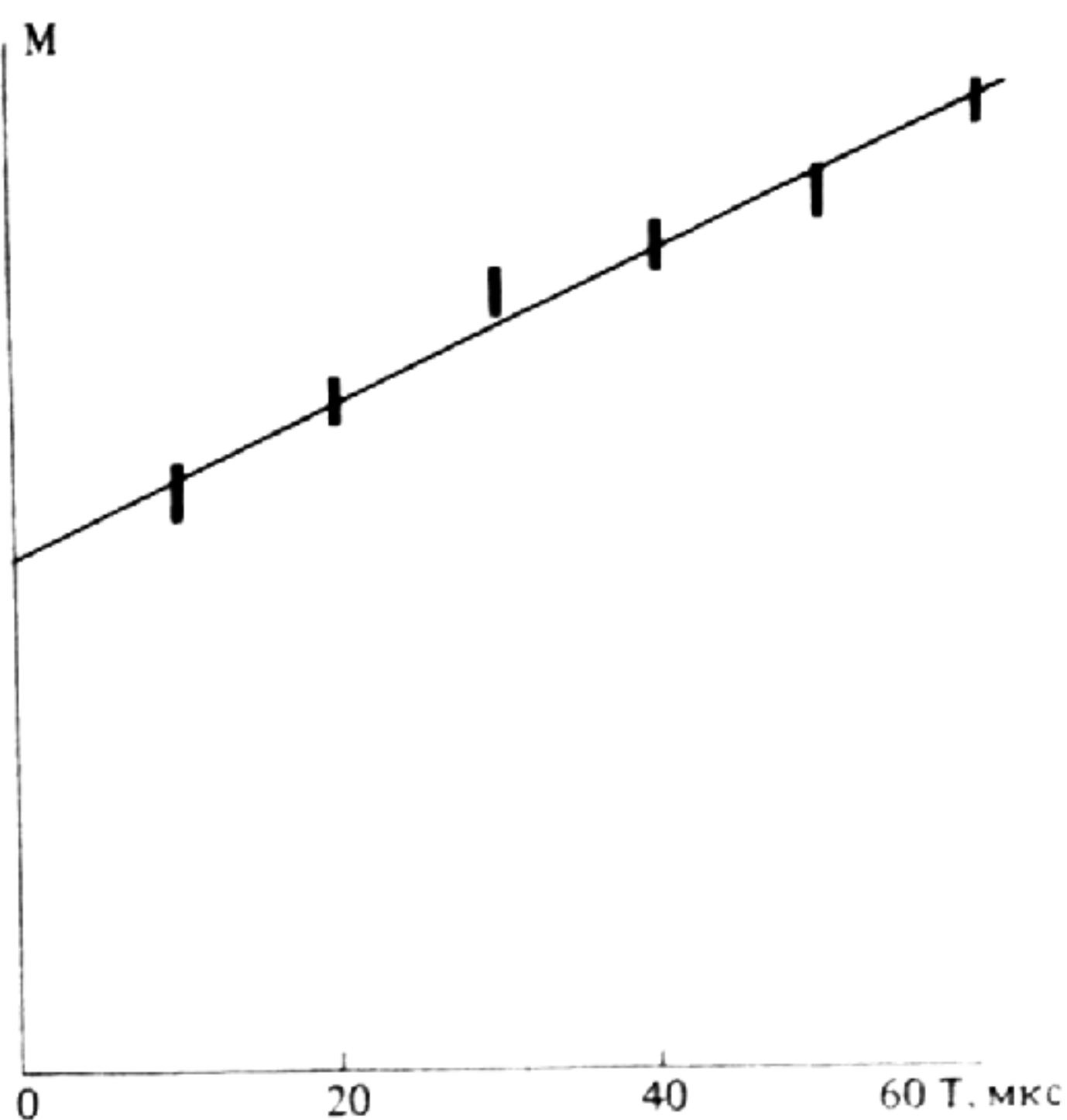


Рис. 4. Зависимость глубины модуляции от длительности импульса

#### Л и т е р а т у р а

1. У х а н о в Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.
2. К и з е л ь В.А. Отражение света. М.: Наука, 1973.
3. А с к е р о в Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука, 1985.

4. Антонык А.Д., Боцкарев С.Э., Дьяченко А.Г., Любченко В.Е., Скорик В.А. Электронная техника, Сер. Электроника СВЧ, 1988, вып. 9(413), с. 24.

5. Бережинский Л.И., Липтуга А.И. Квантовая электроника. Киев, 1984, № 27, с. 50.

6. Согкум Р.В., Keith D. J. Opt. Soc. Am., B2, 1873 (1985).

---