УДК 621.3.029.6

В. С. АШАНИН, канд. физ.-мат. наук, *О. П. МАЛОФЕЙ*, канд. техн. наук, *А. А. СТЕПАНОВ*, канд. физ.-мат. наук, *В. Н. ТУПКАЛО*, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПОСРЕДСТВОМ ЭФФФЕКТА ФОТОННОГО ДАВЛЕНИЯ

В работах [1; 2] было впервые исследовано явление фотонного давления — увлечение свободных носителей тока фотонами в полупроводниках. В этом явлении поглощенный импульс фотонов оптической области спектра перераспределяется между решеткой и свободными носителями и вызывает появление направленного потока носителей тока.

Этот эффект наблюдается как в собственных, так и в примесных полупроводниках [3; 4]. В последнем случае он был обнаружен в кремнии и германии, легированных соответственно фосфором и мышьяком.

В ряде последующих работ [5—8] рассматривалось применение этого явления для создания сверхбыстродействующих субнаносекундных приемников импульсного лазерного излучения в инфрокрасной области спектра, работающих при комнатной температуре.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований данного эффекта указывают на наличие прямолинейной зависимости между током увлечения и свободных носителей и их концентраций как в дырочном [1], так и в электронном [9] полупроводниках. Это обстоятельство позволяет принципиально решить задачу по измерению концентрации свободных носителей посредством применения рассматриваемого эффекта.

Следует заметить, что эффект экспериментально наблюдался в интервале концентраций (10^{13}—10^{17}) см$^{-3}$, поэтому применение эффекта позволяет определять малые (10^{13}—10^{14}) см$^{-3}$ концентрации, что является весьма актуальной задачей в настоящее время, решение которой позволило бы эффективно осуществлять так называемый входной контроль параметров полупроводниковых материалов, используемых при серийном изготовлении различных полупроводниковых приборов.

В данной работе рассматривается экспериментальная апробация нового бесконтактного метода измерения концентрации свободных носителей тока в собственных полупроводниках с использованием явления фотонного давления.

В общем случае при прохождении лазерного излучения через образец полупроводника возникает либо продольная, либо поперечная фотоЭДС увлечения. В интересующем нас случае значение фотоЭДС, возбуждаемой в продольном направлении (размеры образца в направлении лазерного луча существенно больше его поперечных размеров), получаем из условия равенства тока увеличения соответствующему току проводимости [8]

$$U = \frac{Pen\rho_0(1-e^{-\alpha l})}{2\pi C S_0 m} \langle\tau\rangle \frac{(1-R)}{(1+R)}, \qquad (1)$$

где P — мощность лазерного излучения; e — элементарный заряд; n — показатель преломления полупроводника; ρ_0 — удельное сопротивление; α — коэффициент поглощения света; l — продольная длина образца полупроводника; $\langle\tau\rangle$ — усредненное время релаксации импульса электронов; R — коэффициент отражения излучения от образца полупроводника; C — скорость света; S_0 — площадь поперечного сечения образца; m — масса электрона.

Записывая данное соотношение с учетом сопротивления образца R_0 и вводя константу $\gamma = en/2\pi Cm$, численное значение которой составляет $6\cdot10^5$ см$\cdot b^{-1}$ c^{-1} [5], получаем

$$U = \frac{P\gamma R_0(1-e^{-\alpha l})}{l} \langle\tau\rangle \frac{(1-R)}{(1+R)}. \qquad (2)$$

Переходя от напряжения к току увлечения, находим

$$I = \frac{P\gamma(1-e^{-\alpha l})}{l} \langle\tau\rangle \frac{(1-R)}{(1+R)}. \qquad (3)$$

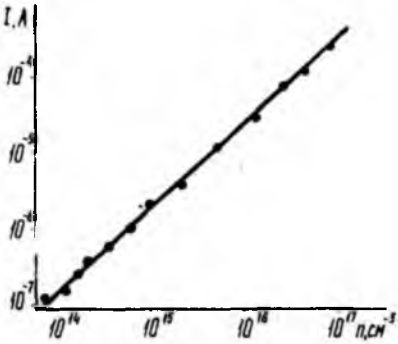
В случае, когда поглощение света в образце мало, что соответствует условию $\alpha l < 1$, и с учетом соотношения $\alpha = S_n \cdot n$, где S_n — сечение поглощения света электронами; n — равновесная концентрация электронов, выражение (3) приобретает вид

$$I = P\gamma S_n n \langle\tau\rangle \left(\frac{(1-R)}{(1+R)}\right). \qquad (4)$$

Из соотношения (4) следует, что для данного образца полупроводника при постоянных мощности излучения лазера и температуре существует линейная зависимость между током увлечения и равновесной концентрацией носителей в полупроводнике.

Эксперименты проводились на цилиндрических образцах с кольцевыми контактами на торцах. Образцы, изготовленные из n-германия, имели площадь поперечного сечения 0,3 см^2 и длину 2 см. Источником инфракрасного излучения ($\lambda = 10{,}6$ мкм) служил лазер на CO_2, работающий в импульсном режиме с частотой следования импульсов 300 Гц и длительностью импульса 0,7 мкс. Мощность излучения в импульсе 10 кВт. Интенсивность излучения лазера контролировалась с помощью охлаждаемого приемника инфракрасного излучения на основе Ge : Cu.

Измерялась продольная фотоЭДС, при этом в цепи образец — сопротивление нагрузки осуществляется режим короткого замыкания. В некоторых экспериментах импульс тока, возникающий на сопротивлении нагрузки, регистрировался осциллографом. Измерения производились при комнатной температуре.



Результаты эксперимента приведены на рисунке, который иллюстрирует графическую зависимость силы тока увлечения свободных носителей от их концентрации в интервале (10^{14}—10^{17}) см$^{-3}$. Выполненные эксперименты подтвердили хорошую воспроизводимость результатов. Численные оценки, проведенные с учетом соотношения (4) и опытных данных для n=Ge, показывают хорошее согласие по порядку величины теории с экспериментом.

В целях контроля полученных данных были проведены эксперименты по измерению электропроводимости с использованием четырехзондового метода. Концентрации ($\times 10^{-15}$ см$^{-3}$), полученные двумя методами, сопоставлены ниже.

Эффект фотонного давления	Четырехзондовый метод
0,2+0,02	0,21
6,5+0,1	6,4
68+1	70

Таким образом, сравнительные результаты находятся в удовлетворительном согласии, что позволяет надеяться на возможность использования эффекта фотонного давления для измерения концентрации носителей в полупроводниках, который может применяться наряду с другими неразрушающими методами контроля.

Список литературы: 1. *Увлечение* свободных носителей фотонами при прямых межзонных переходах в полупроводниках/А. М. Данишевский. А .А. Кастальский, С. М. Рывкин, И. Д. Ярошецкий/Журн. эксперим, и теорет. физики. 1970. **58**, № 2. С. 544—550. 2. *Гринберг А. А.* Эффект увлечения свободных носителей фотонами в германии.//Журн. эксперим. и теорет. физики. 1970. **58**, № 3. С. 989—993. 3. *Эффект* фотонного давления в примесных полупроводниках/П. М. Валов, Б. С. Рывкин, Е. В. Титова, И. Д. Ярошецкий//Физика твердого тела .1971. **5**, № 6. С. 1772—1774. 4. *Анизотропия* эффекта фотонного давления в полупроводниках/П. М. Валов, Б. С. Рывкин, Е. В. Титова, И. Д. Ярошецкий//Физика твердого тела. 1972. **6**, № 1. С. 123—126. 5. *Gibson A. F., Kimmit M. F., Walker A. C.* Photon pressure effects in semiconductors//Appl. Phys. Lett. 1970. **17**. P. 75—79. 6. *Ярошецкий И. Д.* Влияние магнитного поля на эффекты увлечения свободных носителей тока фотонами в полупроводниках: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Л., 1971. 311 с. 7. *Kimmit M. F.* Awen optoelectronic effect in semicouductors//J. Phys. E. 1970. **5**. P. 239—245. 8. *Применение* эффекта фотонного давления в приемниках лазерного излучения/В. Г. Агафонов, П. М. Валов, Б. С. Рывкин, И. Д. Ярошецкий//Физика и техника полупроводников. 1973. **7**, № 10. С. 2316—2321. 9. *Увлечение* электронов фотонами при внутреннем поглощении света свободными носителями тока в полупроводниках/П. М. Валов, А. М. Данишевский, А. А. Кастальский и др.//Журн. эксперим. и теорет. физики. 1970. **59**. № 6. С. 1920—1924.

Поступила в редколлегию 13.04.89