

УДК 621.383

Термоэлектрические явления при инжекции неосновных носителей заряда

В. И. Стафеев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Рассмотрены термоэлектрические явления в полупроводниковых диодных структурах при протекании тока в пропускном направлении при высоких уровнях инжекции. Показано, что в диодах с малой толщиной базовой области основная рекомбинация происходит на контакте с металлом.

Термоэлектрические и термомагнитоэлектрические явления в структурах с равновесными носителями заряда открыты еще в XIX веке, были широко исследованы в XX веке и получили большое практическое применение в современной микрофотоэлектронике и других микроэлектронных устройствах современной техники. Эффект Пельтье — выделение или поглощение тепла на контакте разных материалов при прохождении электрического тока — использован для создания широкоиспользуемых высокоэффективных термоэлектрических охлаждающих устройств [1, 2].

Термоэлектрические явления при инжекции неосновных носителей из *p-n*-перехода в представленной на рис. 1 структуре впервые рассмотрены В. И. Стафеевым [3]. Автор предсказал новое явление — перенос тепла инжектированными носителями. Были рассчитаны коэффициенты Пельтье и термоЭДС, а также возникающая разность температур в зависимости от величины протекающего в пропускном направлении тока.

Позднее эта проблема исследовалась рядом авторов: R. N. Holl [4] (1961 г.); M. A. Melehy [5] (1962 г.); W. M. Billis [6] (1963 г.); З. М. Лукшиер, Н. В. Коломоец [7] (1973 г.).

Разработка теории явления, а также оценка его роли в различных полупроводниковых структурах и перспектив использования в термоэлектрических охлаждающих устройствах продолжены в работах [8—11 и др.].

Подробный теоретический анализ протекающих процессов провел аспирант НИИПФ А. Г. Алексеев [8] (1976 г.).

Экспериментально явление инжекционного переноса тепла было открыто в 1974 г. и исследовано В. П. Пономаренко, Л. А. Бовиной и В. И. Стафеевым в диодах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ [12—16].

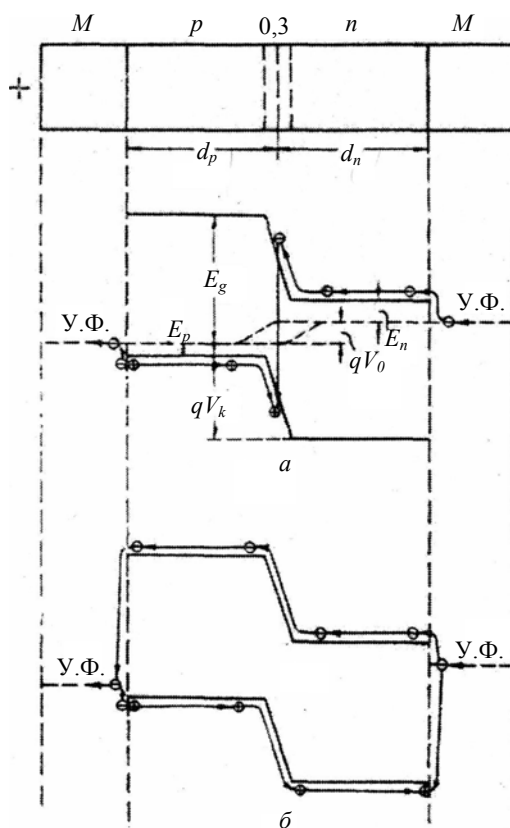


Рис. 1. Прохождение тока и перенос тепла в полупроводниковом диоде с *n-p*-переходом:
a — рекомбинация в слое объемного заряда; *б* — рекомбинация на контактах с металлами — инжекционный диод

Физические основы

Прохождение тока в пропускном направлении в полупроводниковой структуре с *n-p*-переходом сопровождается рождением электронов на контакте металла с *n*-полупроводником и дырок — на контакте металла с *p*-полупроводником. Электро-

ны и дырки преодолевают соответствующие потенциальные барьеры и рекомбинируют в слое объемного заряда n - p -перехода, в квазинейтральных областях базы и на контактах n - и p -областей полупроводника с металлом.

Область основной рекомбинации неравновесных носителей определяется уровнями легирования контактирующих областей полупроводников, шириной их запрещенных зон, соотношением длин диффузионного смещения неравновесных носителей L_n и L_p с толщинами соответствующих областей d_p и d_n .

В полупроводниковых структурах, в которых $L_n \ll d_p$ и $L_p \ll d_n$, при прохождении прямого тока забираемое носителями у решетки вблизи контактов с металлом тепло выделяется при рекомбинации в пределах длин диффузионного смещения у n - p -перехода. В зависимости от соотношения электронного и дырочного токов охлаждается соответствующий контакт с металлом. В структурах с малым временем жизни и высоким уровнем легирования контактирующих областей рекомбинация носителей происходит в слое объемного заряда, и в ней выделяется все забираемое у решетки на контактах с металлами тепло. В таких структурах термоэлектрические явления подобны явлениям при обычном эффекте Пельтье.

При прямом токе нагревается область n - p -перехода и охлаждаются контакты с металлом. Непосредственный контакт n - и p -областей в них может быть заменен контактом через промежуточный слой металла. Однако при малых толщинах слаболегированных полупроводниковых областей ($d_n \ll L_p$ и $d_p \ll L_n$) ("тонкие" диодные структуры) с омическими контактами (контакты с очень высокой скоростью рекомбинации) рекомбинация—генерация носителей вблизи слоя объемного заряда n - p -перехода перестает играть роль. Инжектированные носители доходят до контактов с металлом, на котором они и рекомбинируют. Происходят охлаждение n - p -перехода и нагрев контактов с металлом.

При обратном направлении тока носители "разогреваются" при прохождении сильного электрического поля слоя объемного заряда n - p -перехода. Приобретенную избыточную энергию они отдают решетке в пределах нескольких длин свободного пробега вблизи n - p -перехода.

В таких структурах направление переноса тепла неосновными носителями как при прямом, так и при обратном токе противоположно переносу тепла при обычном эффекте Пельтье.

В структуре с сильно легированными n - и p -областями с проводимостью, близкой к собственной ($p_p \ll n_n$), протекающий ток будет чисто электронный. Поэтому при прямом токе вся пере-

носимая энергия выделяется на контакте p -полупроводника с металлом $Q = E_g - E_p + 2kT - qV_0$. Этот контакт нагревается, а p - n -переход и контакт n -области с металлом охлаждается. В противоположном случае (p -область сильно легирована) будет нагреваться контакт n -области с металлом, а n - p -переход, как и в предыдущем случае, — охлаждаться.

Основные термоэлектрические характеристики, которые оценены из известных термоэлектрических соотношений:

- коэффициент Пельтье $\Pi = Q/q = (E_g - E_p + 2kT - qV_0)/q$;

- коэффициент термоЭДС $\alpha = \Pi/T = (E_g - E_p + 2kT - qV_0)/Tq$,

где $V_0 = kT/q \ln(I/I_s - 1)$; I — протекающий ток; I_s — ток насыщения.

При нулевом внешнем смещении ($V_0 = 0$) эти формулы совпадают с известными формулами для обычных n - p -структур. Величины термоЭДС могут быть очень большими, например в германии, при комнатной температуре значение α может достигать 2,5 мВ/К. Тауц и Тростил [J. Tauc, J. Trousil. Чехосл. физ. журн. 1953. № 3. Р. 120] в германиевых структурах действительно наблюдали такие большие величины термоЭДС.

В инжекционных структурах концентрация инжектированных носителей возрастает с ростом тока, поэтому в отличие от обычных полупроводниковых структур коэффициент Пельтье и термоЭДС с ростом тока убывают:

- термоэлектрическая эффективность $Z = \alpha^2 \sigma / \chi$;
- максимальный перепад температур $T_{\max} = 0,5$;

$$ZT^2 = \{(E_g - E_p + 2kT - qV_0)/q\}^2 (I + I_s) q/kT\chi,$$

где χ — теплопроводность; $\sigma = (I + I_s) q/kT$ — дифференциальная электропроводность структуры.

При "обычном" эффекте Пельтье высокая эффективность достигается при высокой концентрации основных носителей, обеспечиваемой введением большой концентрации легирующей примеси. Это, естественно, приводит к снижению подвижности вследствие рассеяния на ионах примеси. При инжекционном переносе тепла используются максимально чистые полупроводники. Высокая концентрация неосновных носителей обеспечивается инъекцией. Рассеяние носителей на носителях существенно менее эффективно, поэтому их подвижность выше, чем в аналогичном полупроводнике с той же концентрацией носителей того же знака. Концентрация инжектированных носителей максимальна у n - p -перехода и убывает при приближении к контакту с металлом, поэтому они движутся за счет диффузии. Это уменьшает омические потери в базовой области.

В работе [4] проведен аналогичный расчет переносимого инжектированными носителями тепла и возникающей разности температур в "тонких" диодах при высоких уровнях инжекции, но без учета кинетической энергии носителей в зонах. Автор принимает энергии электронов и дырок равными энергии дна и верха соответствующих зон.

В работе [5] проанализирован перенос тепла по модели, аналогичной рис. 1, носителями в "тонких" многослойных структурах типа *p-n-p-n*. Анализ проведен также без учета кинетической энергии носителей.

В работе [6] дан краткий аналитический обзор результатов вышеупомянутых работ и отмечается, что кинетическая энергия носителей в зонах равна mkT , причем ($2 < m < 4$) в зависимости от механизма рассеяния.

В работе [7] проведено уточнение расчетов работы [3]. Приведены расчетные величины термо-ЭДС и перепада температур при комнатной температуре в зависимости от соотношения длины диффузионного смещения и толщины базовой области для диодных структур на основе Ge и Bi_2Te_3 .

Распределение тепловыделения в диодных структурах разных типов описано в монографии [9].

Роль переноса тепла неосновными носителями в диодных и тиристорных структурах подробно проанализирована в монографии [10].

В работе [11] проведен анализ инжекционного переноса тепла при низких уровнях инжекции при комнатной температуре в структуре, аналогичной рассмотренной В. И. Стафеевым (см. рис. 1), с *p-n*-переходом и омическими контактами (см. рис. 1), с толщиной контактирующих полупроводниковых областей порядка 1 мкм в сильнолегированных полупроводниках.

Рассчитаны зависимости коэффициентов Пельтье и возникающей разности температур от протекающего тока и уровня легирования контактирующих полупроводниковых областей в пределах $10^{17} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эти зависимости рассчитаны для полупроводниковых материалов: Si, GaAs, InSb, $Ga_{0,47}In_{0,53}As$, $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$. Эффекты проанализированы при низких уровнях инжекции, поэтому их величины получены примерно такими же, как и при обычном эффекте Пельтье.

Инжекционное охлаждение в диодах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$

В твердых растворах $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с высокой подвижностью электронов, большой длиной

диффузионного смещения возможно создание высокоэффективных *n-p*-переходов [17]. КРТ имеют низкую теплопроводность, при 77 К она составляет порядка 0,015 Вт/(см·К), а при комнатной температуре $\chi \sim 0,01 \text{ Вт/(см·К)}$ [18]. По этим причинам для экспериментальных исследований были выбраны диодные структуры с *n-p*-переходом на основе слоев КРТ *p*-типа проводимости.

Для обеспечения высоких скоростей рекомбинации обе поверхности образцов полировали. Хорошие электрические контакты получали нанесением тонких слоев золота. Для обеспечения хорошего теплоотвода *p*-область образца монтировали на медный теплоотвод. Для уменьшения теплопритоков измерения проводили в камере, вакуумированной до давления ниже 10^{-6} мм рт. ст.

На рис. 2 приведены результаты исследований зависимости температуры охлаждения от протекающего пропускного тока в инжекционных диодах. В лучшем образце при температуре 77 К и токе $\sim 0,3 \text{ А}$ было достигнуто охлаждение до 5,1 К. При комнатной температуре достигнуто охлаждение до 23 К.

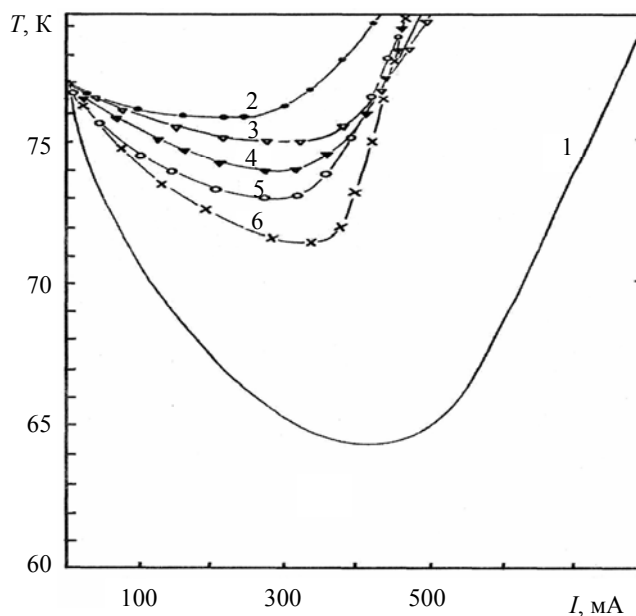


Рис. 2. Термоамперные характеристики инжекционного диода из КРТ:

1 — расчет; 2—6 — экспериментальные данные для разных диодов

В инжекционных диодах расчетная величина без учета рекомбинации носителей в нейтральной *p*-области при 77 К составила $\sim 13 \text{ К}$ (расчет проведен А. Г. Алексеевым) [8]. Естественно, наблюдаемая температура охлаждения ниже расчетной вследствие рекомбинации части носителей в базовой области.

В инжекционном "охладителе" основные носители в базовой области — дырки, но эффект опре-

деляется электронами, подвижность которых более чем на два порядка выше подвижности дырок — основных носителей базовой области. Поэтому величина достижимого охлаждения при обычном эффекте Пельтье в КРТ p -типа проводимости при оптимальном легировании полупроводника будет в сотни раз меньше в соответствии с соотношением подвижностей неосновных и основных носителей в данном материале.

При "обычном" эффекте Пельтье при 77 К в эквивалентном полупроводнике с противоположным по сравнению с базой инжекционного термоохладителя n -типом проводимости расчетная величина достижимого охлаждения (около 4,6 К) также будет меньше. Реально достижимая разность температур, естественно, будет еще ниже, так как необходимая для обеспечения высокой термоэлектрической эффективности электропроводность обеспечивается созданием большой концентрации легирующей примеси, снижающей подвижность носителей. Появление в сильнолегированных полупроводниках "хвостов" плотности состояний и примесных зон ухудшает электропроводность [18].

В последние годы резко возрос интерес к термоэлектрическим явлениям в инжекционных полупроводниковых структурах. Экспериментально достигнутая разность температур в инжекционных диодах намного больше даже расчетной величины в "обычном" эффекте Пельтье.

Использование "инжекционных" диодов обеспечивает возможность создания более эффективных термоэлектрических охлаждающих устройств по сравнению с приборами на "обычном" эффекте Пельтье.

Л и т е р а т у р а

1. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1975.

2. Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Иорданошвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. — М.: Изд-во АН СССР, 1965.

3. Стафеев В. И. Инжекционный перенос тепла//ФТТ. 1960. Т. 2. С. 438.

4. Holl R. N. An analysis of the performanse of thermoelectric devices made from long lifetime semiconductors//Solid State Electron. 1961. № 2. P. 115—122.

5. Melehy M. A.//J. Appl. Phys. 1962. № 33. P. 2100.

6. Billis W. M. Minority carrier thermoelectric cooling//Ibid. 1963. № 34 (6). P. 1648—1649.

7. Лукишер З. М., Коломоец Н. В. О возможностях инжекционных термоэлементов//ФТП. 1973. № 7. С. 172.

8. Алексеев А. Г. Термоэлектрическое охлаждение в полупроводниковом инжекционном диоде/НИИПФ (неопубликованные данные). 1976.

9. Стафеев В. И., Каракушан Э. И. Магнитодиоды. Новые полупроводниковые приборы с высокой чувствительностью к магнитному полю. — М.: Наука, 1975.

10. Blicher A. Thyristor Physics. Spriger — Verlag — New York Heidelberg Berlin, 1976.

11. Pipe K. P., Ram R. I. Bias-dependent Peltier coefficient and internal cooling in bipolar devices//Phys. Rev. 2002. № 66. P. 125316.

12. Пономаренко В. П., Бовина Л. А., Стафеев В. И. Инжекционный перенос тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев из $Cd_xHg_{1-x}Te$ и некоторые возможности создания термоэлектрических охлаждающих устройств вблизи 77 К//Вопросы оборонной техники. Сер. XI. 1974. №. 43. С. 8—9.

13. Пономаренко В. П., Стафеев В. И. Исследования инжекционного переноса тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$: Тр. МФТИ. Сер. Радиотехника и электроника. 1974. № 7. С. 57.

14. Пономаренко В. П., Бовина Л. А., Стафеев В. И. Инжекционный перенос тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ и возможности создания охлаждающих устройств "азотного" уровня//Вопросы оборонной техники, Сер. XI. 1977. № 43. С. 43—45.

15. Стафеев В. И., Пономаренко В. П. Инжекционный перенос тепла в диодах из $CdHgTe$ //II Украинская науч. конф. по физике полупроводников. (Украина, Черновцы-Вижница, 20—24 сентября 2004 г.); Тез. докл. 2004. Т. 1. С. 62—63.

16. Стафеев В. И. Перенос тепла и другие явления в структурах с неравновесными носителями//Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники): Матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005, 8—10 сентября. С. 270—275.

17. Бовина Л. А., Стафеев В. И. Физика соединений $A^III B^VI$. — М.: Наука, 1986. Гл. 8. С. 246—282.

18. Берченко Н. П., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение (A^3B^5): Справочные таблицы. — М.: Воениздат МО, 1982.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

Thermoelectric phenomena at injection of nonbasic carriers of a charge

V. I. Stafeev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The thermoelectric phenomena in semi-conductor diode structures are considered at course of a current in a carrying direction at high levels of injection. It is shown that the basic recombination occurs on a contact to metal in diodes with small thickness of a base area.