

06

Высоковольтный оптоэлектронный трансформатор напряжения на каскаде туннельно-связанных $p^+ - i - n^+$ -диодов

© Ю.Т. Ребане, Ю.Г. Шретер

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 марта 1998 г.

Предлагается идея полупроводникового преобразователя электрических напряжений с оптической связью между первичной и вторичной цепями, который, несмотря на невысокий коэффициент полезного действия, может оказаться эффективным в ряде специфических областей.

Предлагается идея полупроводникового преобразователя электрических напряжений с оптической связью между первичной и вторичной цепями. В первичной цепи преобразователя используется полупроводниковый светодиод или лазер либо их линейки. Вторичная цепь представляет собой каскад $p^+ - i - n^+$ -диодов, связанный через туннельные $n^+ p^+$ -переходы, в которых освещаются только i -области. Коэффициент умножения по напряжению для такого преобразователя составляет $\sim N$, где N — число $p^+ - i - n^+$ -элементов в каскаде. Величина выходного напряжения преобразователя может достигать $> 10^5$ V при достижимых в настоящее время степенях интеграции. Использование оптической связи позволяет развязать электрически вторичную и первичную цепи и сделать прибор способным повышать напряжение в широком диапазоне частот $f = 0 \div 100$ MHz с постоянным коэффициентом умножения.

Принципиальная схема преобразователя показана на рис. 1. Первичная цепь состоит из полупроводникового светодиода или лазера либо их параллельных линеек. Вторичная цепь представляет собой каскад из N штук вертикальных $p^+ - i - n^+$ -диодов, изготовленных интегрально на одной кристаллической пластине и соединенных последовательно. Связь между первичной и вторичной цепями осуществляется оптически.

Принцип действия преобразователя состоит в следующем. Подавая входное напряжение на светодиод, мы преобразуем электрическую энергию в световую, которая затем, поглощаясь в i -областях каскада

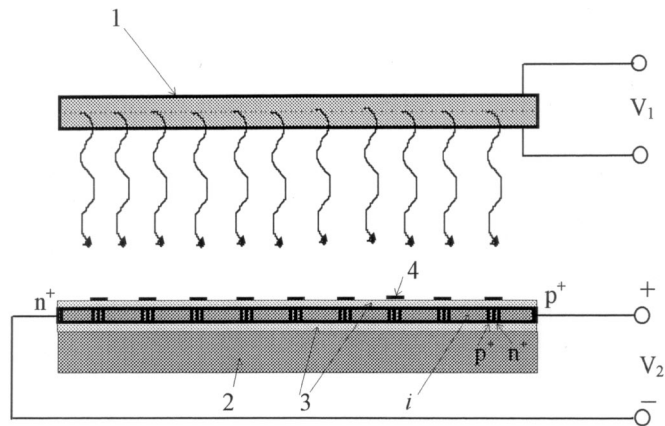


Рис. 1. Общая схема устройства преобразователя; 1 — источник света, 2 — подложка, 3 — изолирующие пленки, например, SiO₂, 4 — маска.

$p^+ - i - n^+$ -диодов, снова преобразуется в электрическую энергию с повышением напряжения. Входное напряжение V_1 , необходимое для питания светодиода, равно по порядку величины ширине запрещенной зоны E_g/e и составляет $1 \div 10 \text{ V}$ в зависимости от используемого полупроводника, при этом выходное напряжение V_2 будет порядка $N E_g/e$. Таким образом, коэффициент преобразования напряжения k_u для данного устройства будет $\sim N$ и при доступных в настоящее время степенях интеграции $> 10^6 \text{ cm}^{-2}$ может достигать величины $k_u > 10^6$.

Ключевым элементом преобразователя является вторичная цепь, состоящая из каскада $p^+ - i - n^+$ -диодов, повышающего напряжение. Существенным для работы каскада являются наличие i -областей, которые создают асимметрию по отношению к изменению знака тока в каскаде. Такая асимметрия необходима для работы каскада любых элементов. Поэтому, например, простая последовательная интеграция $p - n$ -областей не приводит к повышению напряжения в каскаде по сравнению с отдельным элементом. Известно, однако, что каскад последовательно соединенных $p - n$ -переходов применялся ранее в высоковольтных солнечных элементах [1–2]. Необходимая асимметрия в этом случае достигалась за счет металлических соединений между $p - n$ -переходами. Использование таких соединений эквивалентно по-

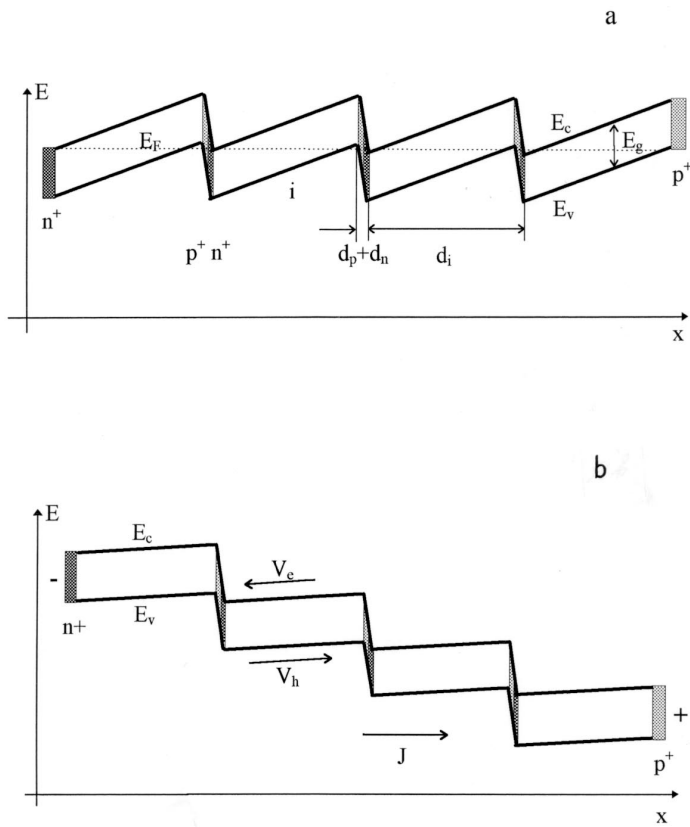


Рис. 2. Энергетическая схема прибора без освещения (*a*) и при освещении (*b*). E_c , E_v , E_g — зона проводимости, валентная зона и уровень Ферми соответственно; d_i , d_n , d_p — ширина собственной области и сильнолегированных n^+ - и p^+ -областей соответственно; V_e , V_h , J — направления средних дрейфовых скоростей электронов и дырок и тока через структуру соответственно.

следовательно соединению отдельных фотоэлементов и позволяет получать достаточно высокое напряжение (сотни вольт [2]). Отметим, однако, что подобная интеграция приводит к дополнительным встречно включенным барьерам Шоттки на металлических контактах, которые понижают эффективность работы каскада.

В настоящей работе мы предлагаем использовать каскад $p^+ - i - n^+$ -диодов с сильнолегированными n^+ - и p^+ -областями. При соединении такие диоды образуют туннельные контакты n^+p^+ , сопротивление которых мало. При освещении i -областей генерируемые светом электроны и дырки разделяются встроенным электрическим полем в i -области и суммарный ток течет слева направо, от n^+ к p^+ , против приложенного напряжения (рис. 2, *b*). В туннельных же контактах встроенное электрическое поле направлено противоположно полю в i -области, и при их освещении ток в них течет навстречу току в i -областях, понижая суммарное выходное напряжение каскада. Для эффективной работы каскада нужно защитить n^+ - к p^+ -области от света с помощью масок (рис. 1). Носители, генерируемые в i -областях, притягиваются электрическим полем к туннельным p^+n^+ -переходам и рекомбинируют там, замыкая, таким образом, всю цепь каскада. Для обеспечения непрерывности тока весь каскад должен быть освещен равномерно.

Вольт-амперная характеристика в пренебрежении рекомбинацией носителей в i -областях и сопротивлением туннельных контактов имеет вид

$$J = S(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)(\varepsilon_g - eV/N) \exp(-\varepsilon_g/kT) \\ \times [\exp(eV/NkT) - 1]/d_i \left\{ 1 - \exp[(eV/N - \varepsilon_g)/kT] \right\} \\ - e(W\varepsilon_g) \left\{ \left\{ 1 + \exp[(eV/N - \varepsilon_g)/kT] \right\} / \left\{ 1 - \exp[(eV/N - \varepsilon_g)/kT] \right\} \right\} \\ - 2kT/(\varepsilon_g - eV/N) \left. \right\},$$

где n_0 и p_0 — концентрации электронов и дырок в n - и p -областях, μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок в i -области, ε_g — ширина запрещенной зоны, N — число элементов в каскаде, d_i и S — ширина и площадь поперечного сечения i -области, W — мощность падающего на каскад излучения.

Рассчитанная вольт-амперная характеристика преобразователя с числом элементов в каскаде $N = 10^6$ на кремнии приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что преобразователь позволяет, в принципе, получать высокие напряжения вплоть до $8 \cdot 10^5$ В.

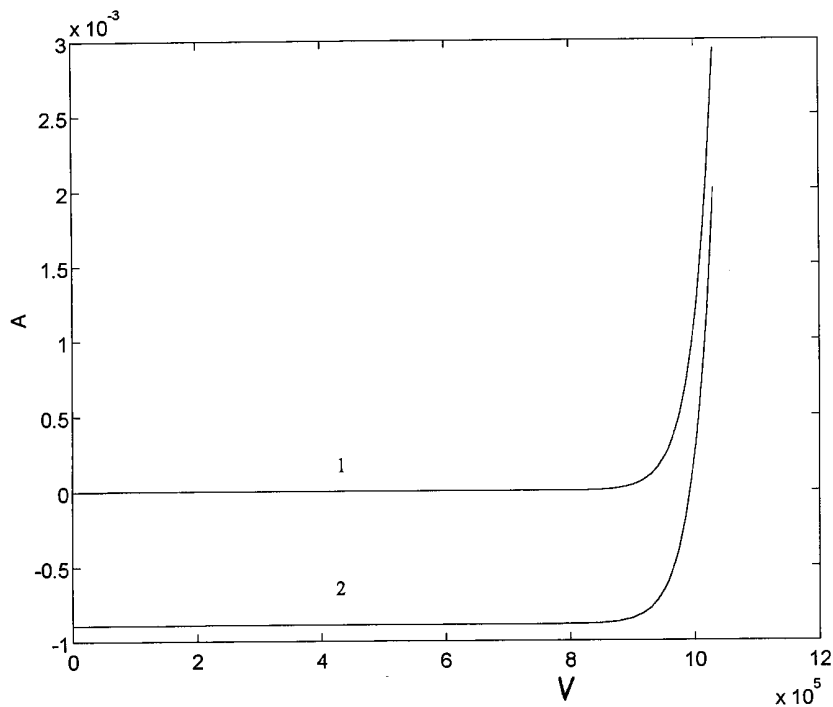


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика идеального каскада на Si: 1 — без облучения, 2 — при облучении с мощностью 1 kW. Параметры каскада: $N = 10^6$, $n_0 = p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $d_i = 1 \mu\text{m}$, $S = 10^{-8} \text{ cm}^2$, $T = 300 \text{ K}$.

Быстродействие прибора τ определяется суммой времен $\tau_1 + \tau_2$, где τ_1 — время разделения носителей в одной i -области, а τ_2 — время туннелирования и рекомбинации в p^+n^+ -переходе. Обычно τ_1 много больше, чем τ_2 , и τ можно оценить как $\tau = \tau_1 \sim el^2/\mu E_g = 10^{-6 \div 8} \text{ s}$, где l — размер i -области, μ — подвижность носителей в i -области и E_g — ширина запрещенной зоны. Таким образом, прибор способен повышать напряжение в диапазоне частот $f = 0 \div 100 \text{ MHz}$ с постоянным коэффициентом преобразования.

Коэффициент полезного действия реального преобразователя определяется произведением эффективности используемого излучателя, эф-

эффективности поглощения света во вторичной цепи и эффективностью разделения носителей в i -областях. Предварительный анализ различных способов реализации прибора позволяет надеяться на коэффициент полезного действия порядка 5%. Одним из возможных вариантов является использование во вторичной цепи пленок кремния, изолированных от подложки по SIMOX технологии, и применение голубых светодиодов на основе GaN с целью уменьшения длины поглощения света.

Несмотря на невысокий коэффициент полезного действия, данный преобразователь напряжения может найти ряд специфических применений, например в технике физического эксперимента, в переносных высоковольтных детекторах ионизирующего излучения, в помехоустойчивых оптоволоконных устройствах поджига топлива для ракет и самолетов, а также в устройствах электронного зажигания для автомобилей.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 96-02-17825) и программой "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 1001).

Список литературы

- [1] Андрюшин Е.А., Силин А.П. // УФН. 1991. Т. 161. В. 8. С. 129.
- [2] Ландсман А.П., Стребков Д.С. // ФТП. 1970. Т. 4. С. 1922.