

Тиристор, управляемый электромагнитным полем

МОНАХОВ А.Ф., ГРАЧЕВ Г.С.

Постоянно усложняющиеся научно-технические задачи, решаемые силовой полупроводниковой электроникой, требуют управления полупроводниковыми приборами не только путем изменения характеристик тока управления, но и внешними воздействиями, обеспечивающими гальваническую развязку силовых и управляющих цепей. Широко используемое для управления оптическое излучение (фототиристоры, фототранзисторы и др.) требует формирования оптических каналов (источник излучения—световод—фотоприемник), что приводит к дополнительным затратам на преобразование электрического сигнала в оптический. Предлагаемое в статье техническое решение в виде тиристора, управляемого электромагнитным полем, позволяющее осуществить бесконтактное переключение, может быть использовано в электромашинных преобразователях, так и для защиты электрических цепей от внешних воздействий — сетевых перенапряжений и импульсов электромагнитного поля. Для решения поставленной задачи предлагается не плоскостная полупроводниковая структура, а трубчатая. Такая форма полупроводникового прибора позволяет использовать для электромагнитной связи соосные катушки, в данном случае винтообразный управляющий электрод и внешнюю по отношению к трубчатой полупроводниковой структуре катушку-индуктор. При подаче импульса тока на катушку-индуктор на винтообразном электроде наводится ЭДС, что эквивалентно подаче управляющего тока в обычном тиристоре. Приводится не только идея способа переключения тиристора электромагнитным полем, но и проводится теоретический анализ взаимосвязи между характеристиками магнитного потока индуктора и накоплением критического заряда в р-базе, приводящего к переключению тиристора. Получены математические зависимости, позволяющие рассчитать скорость изменения магнитного потока, обеспечивающего накопление критического заряда и переключение тиристора за заданное время с учетом сопротивления полупроводниковых слоев межвитковому току. Показано, что применение винтообразной конструкции позволяет снизить время выключения тиристора.

Ключевые слова: тиристор, электромагнитное поле, бесконтактное переключение, трубчатая полупроводниковая структура, винтообразный электрод

В статье рассматривается тиристор на основе трубчатой полупроводниковой структуры (ТПС) с винтообразным управляющим электродом, переключаемый электромагнитным полем (ЭМП). Источником поля может быть катушка-индуктор, внутри которой соосно расположена ТПС, а также внешние электромагнитные воздействия, вызванные перенапряжениями в сетях, ударами молний, ядерными взрывами и т.п. Предлагаемый тиристор может быть использован для управления электрическими машинами, а также в системах противоаварийной автоматики для гальванической развязки цепей управления и силового электрооборудования.

Основным элементом тиристора является ТПС в виде полого цилиндра с коаксиально расположенными полупроводниковыми слоями (рис. 1,а), образующими анодный эмиттер (слой p_1), n -базу (слой n_1), p -базу (слой p_2), катодный эмиттер (слой n_2^+). Слой p_1 имеет трубчатый металлический электрод, а слой n_2^+ — винтообразный электрод, при этом слой n_2^+ имеет также винтообразную конструкцию. В отличие от обычных тиристоров [1], имеющих три электрода (анодный, катодный и управляющий), данный тиристор имеет два элект-

рода: анодный и катодный. Роль управляющего электрода выполняет винтообразный катодный электрод, на котором под действием внешнего импульсного ЭМП наводится межвитковая ЭДС, смещающая n^+ - p переход в прямом направлении и запуская процесс переключения тиристора в проводящее состояние [2].

В качестве источника ЭМП служит катушка-индуктор, расположенная коаксиально по отношению к ТПС (рис. 2,а). При подаче на катушку \mathcal{I} импульса тока вблизи нее образуется магнитное поле. Вектор напряженности магнитного поля направлен по оси катушки \mathcal{I} и ТПС (1). В свою очередь, изменение магнитного потока катушки-индуктора приводит к появлению ЭДС взаимной индукции между витками винтообразного электрода 2. Поскольку индуктивное сопротивление винтообразного электрода 2 в начальный момент времени велико, а винтообразный полупроводниковый слой разделен с полупроводниковым слоем p_2n^+ - p переходом, то ток, обусловленный межвитковой ЭДС, будет протекать вдоль слоя p_2 . Обтекание током эмиттерного n^+ - p перехода, прилегающего к поверхности, вызовет его смещение и инжекцию неосновных носителей заряда в полупроводниковый слой p_2 . Далее процесс включения развивается так же, как и при подаче импульса управляющего тока

в базовый слой p_2 с помощью управляющего электрода [1]. Следует отметить, что тиристор может включаться и путем непосредственной подачи импульса тока на витки винтообразного электрода.

Другим преимуществом тиристора с винтообразным электродом является увеличение начальной области включения за счет большей по отношению к обычным тиристорам протяженности периметра $n^+ - p$ перехода и в особенности его шунтирование (рис. 1, б). Это позволяет устранить отрицательные последствия эффекта di/dt [1].

Поскольку мощность цепи управления, т.е. ток и напряжение в цепи индуктора (рис. 2, а), необходимые для переключения тиристорной структуры 1, определяются взаимной индуктивностью индуктора 3 и винтообразного электрода 2, то для ее увеличения могут быть использованы либо ферромагнитный стержень, расположенный по оси ТПС, либо замкнутый магнитопровод 4, проходящий через ТПС 1 и катушку-индуктор (рис. 2, б). Это позволяет практически полностью исключить рассеяние магнитного потока индуктора и снизить мощность цепи управления. При подаче сигнала управления на индуктор магнитный поток проходит по замкнутому магнитопроводу и наводит ЭДС на витках винтообразного электрода. Далее процесс переключения развивается аналогично описанному выше. Поскольку потери в магнитопроводе из-за появления вихревых токов зависят от частоты, то применение этого способа ограничено низкими частотами.

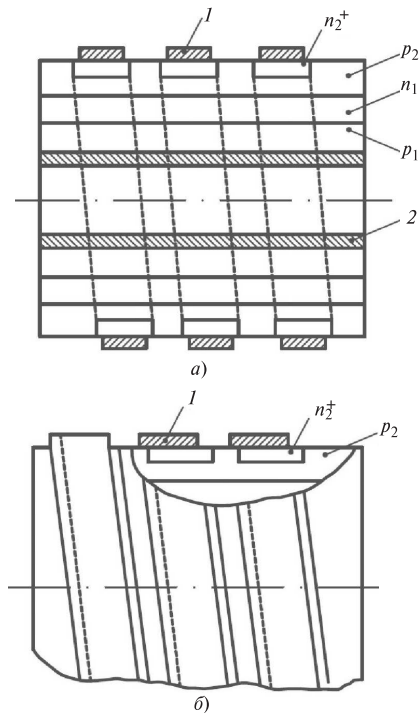


Рис. 1. Трубочатые полупроводниковые структуры тиристора без шунтирования эмиттерного $n^+ - p$ перехода (а) и с шунтированием: 1 – внешний винтообразный электрод; 2 – внутренний электрод

Уменьшение времени выключения достигается синхронизацией момента выключения полупроводникового прибора и момента спада тока в катушке индуктора. При достаточно крутом заднем фронте импульса тока управления в индукторе изменяющийся магнитный поток наводит на винтообразном электроде ЭДС противоположного относительно момента включения знака. Это приводит к более быстрому «рассасыванию» избыточных носителей заряда в базовых областях и снижению времени выключения. Кроме того, уменьшение рабочего тока в винтообразном электроде приводит к появлению ЭДС самоиндукции между витками, что также способствует уменьшению времени выключения.

Описанный механизм снижения заряда базовых областей аналогичен физическим процессам, протекающим в комбинированно-выключаемом тиристоре на этапе выключения при подаче в цепь управления выключающего значения тока [1].

Для обеспечения оптимальных режимов управления тиристором должны выполняться определенные соотношения между током в индукторе, скоростью изменения магнитного потока индуктора, параметрами ТПС. Например, для транзистора в зависимости от режима работы значение и скорость изменения тока индуктора могут меняться в широких пределах, обеспечивая плавное изменение вольт-амперных характеристик транзистора. Для тиристора электрические параметры индуктора должны иметь определенные значения, создавая ключевой режим работы.

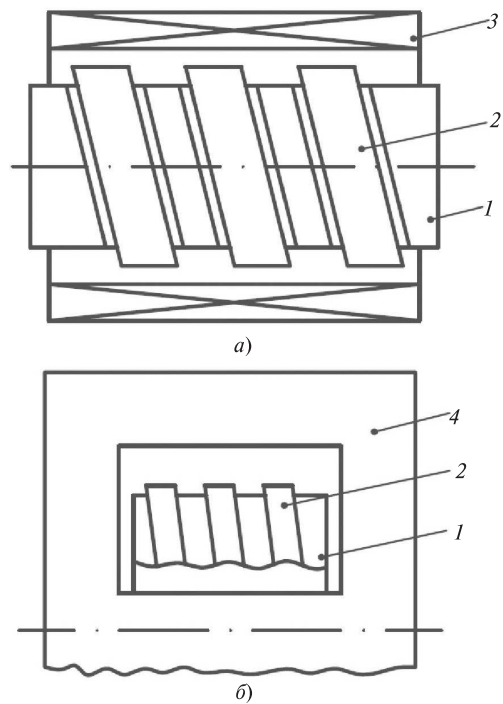


Рис. 2. Тиристорные структуры с индукторами: а – с внешней катушкой; б – с замкнутым магнитопроводом; 1 – тиристорная структура; 2 – винтообразный электрод; 3 – катушка-индуктор; 4 – магнитопровод

Изменение магнитного потока индуктора должно индуцировать межвитковую ЭДС в винтообразном электроде, обеспечивающую протекание тока управления между витками эмиттера и достаточную для смещения эмиттерного n^+-p перехода в прямом направлении и накопления в базе критического заряда, т.е.

$$-d\Phi / dt \geq U_{кр}, \quad (1)$$

где $d\Phi / dt$ – скорость изменения магнитного потока, проходящего внутри ТПС; $U_{кр}$ – межвитковое напряжение, при котором винтообразный эмиттерный n^+-p переход находится в состоянии инжекции, или

$$-d\Phi / dt \geq Q_{кр} R / t_{кр}, \quad (2)$$

где $Q_{кр}$ – критический заряд неосновных носителей в базовых областях, при котором выполняются условия, обеспечивающие лавинный рост тока при включении; $t_{кр}$ – время накопления критического заряда; R – сопротивление полупроводниковых слоев межвитковому току управления.

Последнее выражение получено с учетом

$$U_{кр} = I_y R; \quad (3)$$

$$Q_{кр} = I_y t_{кр}, \quad (4)$$

где I_y – ток управления.

При выключении прибора изменение магнитного потока должно обеспечивать протекание тока управления в течение времени, необходимого для «рассасывания» избыточного заряда в базах. Падение напряжения в этом случае на эмиттерном n^+-p переходе не должно превышать напряжение пробоя, т.е.

$$-I_y R \leq d\Phi / dt \leq -U_B, \quad (5)$$

где U_B – напряжение пробоя эмиттерного n^+-p перехода,

или

$$Q_p R / t_p \leq d\Phi / dt < -U_B, \quad (6)$$

где Q_p – минимальное значение остаточного заряда в базах; t_p – время, необходимое для «рассасывания» избыточного заряда.

Значение $d\Phi / dt$ определяется скоростью изменения тока в индукторе и его индуктивностью. Значение межвитковой ЭДС и тока управления зависят от индуктивности винтообразного эмиттера и межвиткового сопротивления. Значение межвиткового сопротивления зависит от варианта выполнения винтообразного эмиттера: без шунтирования эмиттера (рис. 1,а); со сплошным шунтированием одной из границ эмиттерного n^+-p перехода на поверхности катода (рис. 1,б); с прерывистым шунтированием, например, в форме периодической кри-

вой, осью которой является линия металлургической границы n^+-p перехода на поверхности.

Значение индуктивности винтообразного эмиттера зависит от его диаметра, числа витков и геометрических параметров ферромагнитного сердечника и его магнитной проницаемости.

Рассмотрим возможность практической реализации данного способа переключения на примере высоковольтного (рабочее напряжение 4 кВ и выше) тиристора на основе структуры $p-n-p-n$. Быстродействие таких тиристоров ограничено временем выключения, которое, в свою очередь, зависит от скорости «рассасывания» носителей заряда в базах. Поскольку время жизни неосновных носителей заряда, в особенности в n -базе, велико, то необходимо обеспечить быстрый вывод накопленного заряда. Пусть также необходимо обеспечить гальваническую развязку по цепи управления.

Для осуществления предлагаемого способа переключения выберем конструкцию с замкнутым магнитопроводом в виде прямоугольника. Для удобства охлаждения полупроводниковой структуры разместим ее и индуктор на противоположных сторонах прямоугольного магнитопровода.

Требования к управляющему сигналу, подаваемому на индуктор:

изменение тока в индукторе на этапе включения должно обеспечивать изменение магнитного потока в магнитопроводе, приводящее к появлению межвитковой ЭДС, равной или большей критического значения напряжения эмиттерного n^+-p перехода, т.е.

$$d\Phi / dt \geq U_{кр}; \quad (7)$$

изменение тока в индукторе на этапе выключения di / dt должно обеспечивать изменение магнитного потока, приводящее к появлению межвитковой ЭДС e_y , которая, складываясь с межвитковой ЭДС самоиндукции e_p , вызванной снижением рабочего тока, обеспечивала бы межвитковое напряжение, на 10% меньшее напряжения пробоя эмиттерного n^+-p перехода, т.е.

$$e_y + e_p = 0,9U_{n^+-p}^B. \quad (8)$$

При использовании замкнутого магнитопровода выполняются следующие соотношения:

$$n_{и} / n_{э} \approx U_{и} / U_{э} \approx I_{э} / I_{и}, \quad (9)$$

где $n_{и}$, $n_{э}$ – число витков индуктора и винтообразного электрода; $U_{и}$, $U_{э}$ – напряжения на индукторе и на концах винтообразного электрода; $I_{э}$, $I_{и}$ – токи между концами винтообразного электрода и в индукторе.

Поскольку винтообразные электрод и n^+ -эмиттер не аналогичны обычной катушке, а эквива-

лентны катушке, между витками которой включены резисторы, то дальнейший расчет следует вести по току, наведенному в винтообразном электроде. Напряжение между витками определяется с учетом эквивалентной схемы, состоящей из параллельно соединенных индуктивности электрода L и сопротивления полупроводниковых слоев R межвитковому току, тогда согласно [2]

$$u(t) = RI_y \exp(-Rt / L). \quad (10)$$

Условие, обеспечивающее включение прибора и позволяющее определить ток в индукторе с учетом (7), (9) и (10), запишем в виде

$$(I_{и} n_{и} R / n_{э}) \exp(-Rt_{вкл} / L) \geq U_{кр}. \quad (11)$$

Винтообразный полупроводниковый слой и электрод рассчитываются из условия эффективности управления тиристора межвитковым током.

Для переключения полупроводникового прибора необходимо, чтобы в период подачи управляющего импульса t_y напряжение между витками электрода U_L оставалось выше критического значения напряжения $U_{кр}$, при котором прилегающий к поверхности винтообразный $n^+ - p$ переход находится в состоянии инжекции, т.е.

$$U_L \Big|_{t=t_y} \geq U_{кр}. \quad (12)$$

Напряжение между витками согласно (12)

$$U_L(t) = RI_y \exp(-Rt_y / L); \quad (13)$$

условие, обеспечивающее переключение прибора:

$$RI_y \exp(-Rt / L) \geq U_{кр}. \quad (14)$$

Значение L для однослойной катушки определяется по формуле [3]:

$$L = (0,01Dw^2) / (l / D + 0,44), \quad (15)$$

где D — диаметр витка электрода, см; w — число витков электрода; l — длина катушки, см; L — индуктивность, мкГн.

При наличии ферромагнитного стержня

$$L = (k\mu\mu_0 w^2 S) / l, \quad (16)$$

где μ — магнитная проницаемость сердечника; S — площадь поперечного сечения винтообразного электрода; k — коэффициент, зависящий от отношения длины катушки к диаметру.

Сопротивление полупроводниковых слоев межвитковому току будет определяться сопротивлениями $n^+ - p$ перехода $R_{n^+ - p}$ и базового слоя $R_{б}$:

$$R = R_{n^+ - p} + R_{б}. \quad (17)$$

Значение $R_{n^+ - p}$ зависит от напряжения и определяется вольт-амперной характеристикой $p - n$ перехода. При аппроксимации вольт-амперной характеристики $p - n$ перехода и сопротивления базового слоя функцией

$$I = \alpha U^2, \quad (18)$$

выражение для напряжения между витками винтообразного электрода имеет вид

$$u_L(t) = \sqrt{I_y / \alpha} - (t_y / 2L\alpha). \quad (19)$$

В случае, когда электрод перекрывает одну из границ $p - n$ перехода и шунтирует его,

$$R = R_{б}; \quad (20)$$

$$U_L(t) = I_y R_{б} \exp(-R_{б}t / L). \quad (21)$$

Значение $R_{б}$ зависит от геометрии полупроводниковой структуры и профиля легирования базового слоя. Для полупроводниковой структуры в виде полого цилиндра и коаксиально расположенного приповерхностного базового слоя [4]

$$R_{б} = \rho l_w / 2\pi r W, \quad (22)$$

где ρ — усредненное сопротивление базового слоя; l_w — расстояние между витками; r — средний радиус цилиндрической базовой области; W — толщина базовой области.

Для зашунтированного $n^+ - p$ перехода условие (14) с учетом (15) и (22) примет вид:

$$I_y (\rho l_w / 2\pi r W) \exp\left[-\frac{\rho l_w (l / D + 0,44)}{2\pi r W 0,01 D w^2} t_y\right] \geq U_{кр}, \quad (23)$$

где приняты следующие единицы измерения: U , В; I , А; ρ , Ом·см; l , r , D , W , см; t , мкс; для ТПС, у которых $r \gg W$, значение $D \approx 2r$.

Из (23) определяется ширина винтообразного $n^+ - p$ перехода l_w , влияющая на эффективность управления. Кроме того, l_w влияет на такие неодномерные эффекты, как распространение включенного состояния и вытеснение эмиттерного тока, и определяется также с учетом предельного значения тока и динамических параметров полупроводникового прибора.

Расчет для ТПС с диаметром и высотой, равными 4 см, и профилем легирования, соответствующим блокирующему напряжению 4 кВ, винтообразным электродом с 4 витками, показал, что напряжение на $n^+ - p$ переходе, превышающее критическое 0,3 В при импульсе тока 1 А, будет сохраняться не менее 3 мс, что достаточно для включения тиристора.

Таким образом, тиристор, управляемый электромагнитным полем, обеспечивает:

гальваническую развязку цепи управления и силовых цепей, содержащих защитно-коммутационные аппараты и силовое электрооборудование;

меньшее время включения, поскольку стадия распространения включенной области лимитируется только шириной винтообразного электрода;

большие значения $di/dt_{кр}$, так как ток управления, протекающий между витками спирали, инициирует процесс включения по всей площади полупроводниковой структуры;

меньшее время выключения, т.к. при уменьшении коммутируемого тока между витками спирали электрода возникает разность потенциалов, поддерживающая эмиттерные n^+ - p переходы в открытом состоянии, а это, в свою очередь, способствует оттоку избыточных носителей заряда из базовых областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тейлор П.** Расчет и проектирование тиристорov — М.: Энергоиздат, 1990, 208 с.
2. **Теоретические** основы электротехники/Под ред. Г.А. Ионкина. — М.: Высшая школа, 1976, т.1 — 544 с., т. 2 — 386 с.
3. **Жеребцов И.П.** Электрические и магнитные цепи — Л.: Энергоатомиздат, 1982, 216 с.
4. **Монахов А.Ф., Степанов Г.П.** Расчет плоскостных тиристорov. — М.: Изд-во Московского энергетического института, 1984, 76 с.

[26.04.2017]

Авторы: Монахов Александр Федорович окончил Московский энергетический институт (ныне «Национальный исследовательский университет «МЭИ») в 1969 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1998 г. Доцент «НИУ «МЭИ».

Грачев Григорий Сергеевич студент (магистрант) института электротехники «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 9, pp. 42–46

DOI:10.24160/0013-5380-2017-9-42-46

A Thyristor Controlled by Electromagnetic Field

MONAKHOV Aleksandr F. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — «NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Associate Professor, Cand.Sci. (Eng.)

GRACHEV Grigorii S. (*«NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Magistrate

The constantly sophisticating scientific and technical applications involving the use of power semiconductor electronic systems are setting forth requirements according to which the semiconductor devices should be controlled not only through varying the control current parameters, but also through applying external effects that allow control circuits to be electrically isolated from the power circuits. Light emission techniques, which are widely used for control purposes (photothyristors, phototransistors, etc.) involve the need to set up optical channels (emission source — light guide — photoreceiver) the use of which entails additional expenditures for converting an electric signal into an optical one. The proposed technical solution involving a thyristor controlled by electromagnetic field, by means of which contactless switching can be implemented, can be used in converters for electrical machines and to protect electric circuits from external impacts, like network overvoltages and electromagnetic field impulses. For solving the above-mentioned problem, it is proposed to use a tubular superconducting structure instead of the conventional planar one. With a semiconductor shaped in such manner, it becomes possible to use coaxial coils for organizing electromagnetic coupling, specifically, a screw-shaped control electrode and an inductor coil arranged externally with respect to the tubular semiconductor structure. When a current impulse is applied to the inductor coil, an EMF is induced in the screw-shaped electrode, which is equivalent to applying control current in a usual thyristor. The proposed basic idea of the method for switching a thyristor by means of electromagnetic field is supplemented with a theoretical analysis of interrelation between the inductor magnetic flux characteristics and accumulation of critical charge in the thyristor's p-base causing the thyristor switching to occur. The article presents mathematical dependences for calculating the magnetic flux variation rate sufficient for accumulation of the critical charge that will cause the thyristor switching to occur within the specified time taking into account the impedance the semiconducting layers offer to the interturn current. It has been demonstrated that the use of a screw-shaped electrode design makes it possible to achieve a shorter thyristor closing time.

Key words: *thyristor, electromagnetic field, contactless switching, tubular semiconductor structure, screw-shaped electrode*

REFERENCES

1. **Teilor P.** Raschet i proyektirovaniye tiristorov (Calculation and design of thyristsors). Moscow, Energoizdat, 1990, 208 p.
2. **Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki / Pod red. G.A. Ionkina** (Theoretical foundation of electrical engineering / Edit. by G.A. Ionkin). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1976, vol. 1, 544 p.; vol. 2, 386 p.

3. **Zherebtsov I.P.** *Elektricheskiye i magnitnye tsepi* (Electric and magnetic circuits). Leningrad, Energoatomizdat, 1982, 216 p.

4. **Monakhov A.F., Stepanov G.P.** *Raschet ploskostnykh tiristorov* (Calculation of planar thyristors). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 1984, 76 p.

[26.04.2017]