

# Схемы оптоэлектронного управления мощными МОП-транзисторами

**Борис Сергеев (г. Екатеринбург)**

**В статье рассмотрены схемотехнические особенности оптоэлектронного управления МОП-транзисторами в устройствах силовой электроники. Показано, что использование фотодиодов позволяет оптимизировать схемы управления и получить новые полезные качества ключей.**

Преимущества МОП-транзисторов перед биполярными транзисторами в устройствах силовой электроники известны, и одним из важнейших является минимизация мощности, затрачиваемой на управление ключами. Исследованы и разрабатываются различные типы схем управления МОП-транзисторами [1]. Рассматриваются вопросы применения оптоэлектронных устройств для реализации гальванической развязки управляющего входа, которая является необходимым функциональным свойством устройств силовой электроники [2].

На рисунке 1 показан пример использования оптоэлектронного устройства для управления ключом на МОП-транзисторе [3]. Поскольку входное сопротивление силового МОП-транзистора ( $V_{T_c}$ )  $R_{вх} \rightarrow \infty$ , то при наличии тока  $i_{св}$ , протекающего через светодиод  $VD_{св}$  оптопары, напряжение затвор-исток  $V_{T_c}$  определяется как  $U_{зи} = kU_{ф}$ , где  $U_{ф-ЭДС}$  – напряжение фото-ЭДС одного фотодиода оптопары. Однако это относится лишь к статическому режиму работы транзистора  $V_{T_c}$ , когда длительность переходных процессов переключения пренебрежимо мала по отношению к частоте следования импуль-

сов переключения транзисторного ключа.

На рисунке 2а приведены вольтамперные характеристики (ВАХ) фотодиода, соответствующие темновому режиму работы, когда  $\Phi = 0$ , и режиму генерации фото-ЭДС, для которого  $\Phi > 0$ . Характеристика имеет две особые точки: ток короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжение холостого хода  $U_{хх}$ . Значение  $U_{хх}$  для кремниевых фотодиодов, применяемых в оптопарах, находится в пределах 0,3...0,5 В. На рисунке 2б показана типовая сток-затворная характеристика МОП-транзистора. Она показывает, что для обеспечения включенного состояния  $V_{T_c}$  в статическом режиме работы требуется обязательное выполнение неравенства  $kU_{хх} > U_{зи\text{пор}}$ . При наличии тока стока  $I_{с\text{макс}}$  и необходимости получения достаточно малого напряжения сток-исток  $U_{си\text{вкл}}$  транзистора во включенном состоянии требуется напряжение  $u_{зи} = U_{зи1} > U_{зи\text{пор}}$  (см. рис. 2б). Это напряжение должно быть равно:

$$U_{зи1} = kU_{хх} \geq \left( \frac{I_{с\text{макс}}}{S_{\text{мин}}} + U_{зи\text{пор}} \right), \quad (1)$$

где  $S_{\text{мин}}$  – минимальное нормированное значение крутизны характеристики МОП-транзистора.

Из выражения (1) может быть определено количество фотодиодов  $k$ , которое требуется для создания необходимой величины  $U_{зи1}$ . Очевидно, что для уменьшения  $k$  требуются МОП-транзисторы с малыми значениями пороговых напряжений  $U_{зи\text{пор}}$ .

Одним из недостатков мощных МОП-транзисторов являются значительные междуэлектродные ёмкости затвор-исток ( $C_{зи}$ ), сток-исток ( $C_{си}$ ) и сток-затвор ( $C_{сз}$ ), пропорциональные крутизне характеристики. Влияние этих ёмкостей на процессы переключения МОП-транзистора имеет сложный характер [3]. Далее будут рассмотрены переходные процессы переключения  $V_{T_c}$  при учёте одной ёмкости –  $C_{зи}$ .

Динамические процессы работы транзисторного ключа зависят от характера взаимозависимости токов и напряжений ВАХ фотодиодов, которая может быть выражена дифференциальными сопротивлениями, показанными на рисунке 2а пунктирными линиями сопротивлений  $R_{вкл}$  и  $R_{выкл}$ . Эти зависимости определяют временные параметры переходных процессов включения и выключения МОП-транзистора соответственно. Если аппроксимировать нелинейные ВАХ фотодиода (см. рис. 2а) прямыми линиями и соответствующими источниками напряжения, то эквивалентная схема входной цепи МОП-транзистора с учётом ёмкости  $C_{зи}$  будет иметь вид, показанный на рисунке 3. Постоянные времени заряда и разряда ёмкости  $C_{зи}$ , определяющие дли-

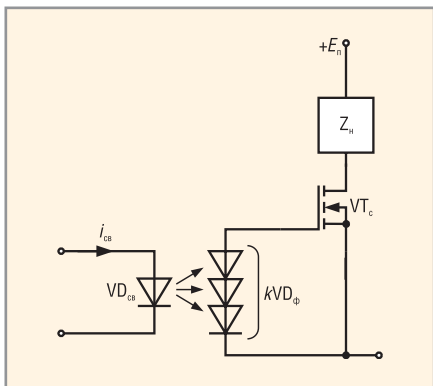


Рис. 1. Схема ключа на МОП-транзисторе

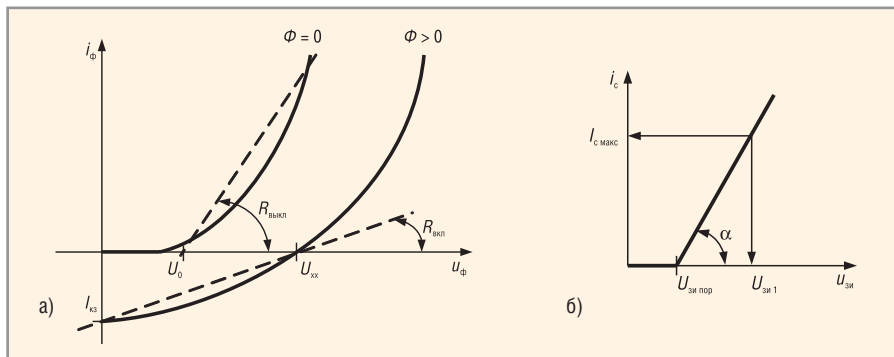


Рис. 2. Вольтамперная характеристика фотодиода (а) и сток-затворная характеристика МОП-транзистора (б)

тельность переходных процессов включения и выключения МОП-транзистора, равны:

$$t_{\text{вкл}} = kR_{\text{вкл}}C_{\text{зи}}, t_{\text{выкл}} = kR_{\text{выкл}}C_{\text{зи}} \quad (2)$$

Очевидно, что при включенном состоянии МОП-транзистора фотодиоды  $kU_{\text{ф}}$  работают в режиме источника электрической энергии, заряжающего конденсатор  $C_{\text{зи}}$ , а при выключенном – в режиме приемника энергии от заряженного  $C_{\text{зи}}$ . Переключение режима входной цепи МОП-транзистора условно показано ключом К (см. рис. 3).

Временные диаграммы процессов переключения МОП-транзистора приведены на рисунке 4. Если принять стандартный уровень отсчёта временных параметров логических электрических сигналов за  $0,5U_{\text{макс}}$  (или  $0,5I_{\text{макс}}$ ), то время задержки распространения сигнала для рассматриваемого транзисторного ключа определяется как

$$t_{\text{зд}}^{0,1} = t_3 - t_1, t_{\text{зд}}^{1,0} = t_5 - t_4. \quad (3)$$

Предполагается, что входным сигналом ключа является излучение Ф

светодиода  $VD_{\text{св}}$ , а выходным – ток стока  $i_c$ .

Напряжение затвор-исток, соответствующее току стока  $0,5I_{\text{смакс}}$ , определяется из (1) как

$$U_{\text{зи } 0,5} = \left( \frac{0,5I_{\text{смакс}}}{S} + U_{\text{зипор}} \right), \quad (4)$$

где  $S$  соответствует реальному значению крутизны характеристики МОП-транзистора.

Поскольку характер изменения напряжений во входной цепи транзисторного ключа имеет экспоненциальный вид, с учётом (4) можно получить уравнения для определения времени задержки:

$$t_{\text{зд}}^{0,1} = \tau_{\text{вкл}} \ln \left( \frac{kU_{\text{xx}}}{kU_{\text{xx}} - U_{\text{зипор}} - \frac{0,5I_{\text{смакс}}}{S}} \right); \quad (5)$$

$$t_{\text{зд}}^{1,0} = \tau_{\text{выкл}} \ln k \left( \frac{U_{\text{xx}} - U_0}{\frac{0,5I_{\text{смакс}}}{S} + U_{\text{зипор}} - kU_0} \right). \quad (6)$$

Приведённый анализ показывает, что наиболее эффективным средством уменьшения времени задержки транзисторного ключа на включение

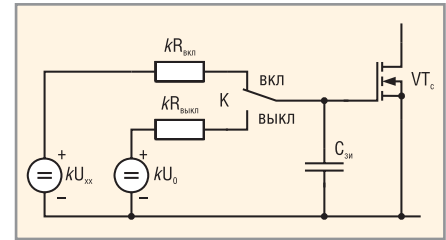


Рис. 3. Эквивалентная схема входной цепи МОП-транзистора

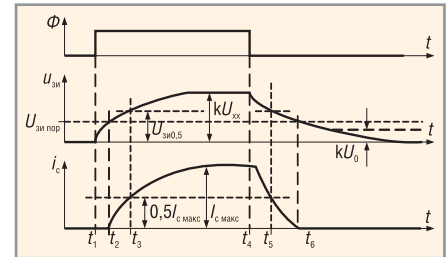


Рис. 4. Временные диаграммы переходных процессов во входной цепи МОП-транзистора

и выключение является уменьшение постоянных времени  $t_{\text{вкл}}$  и  $t_{\text{выкл}}$ , что приводит к необходимости уменьшения сопротивлений  $R_{\text{вкл}}$  и  $R_{\text{выкл}}$ , т.е. дифференциального сопротивления фотодиодов в темновом режиме работы и в режиме генерации фото-ЭДС. Аналогичное влияние оказывает

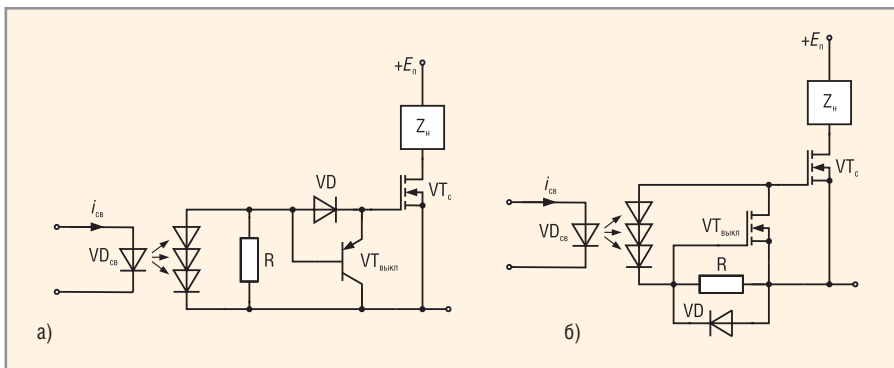


Рис. 5. Варианты схем управления, повышающих быстродействие МОП-транзистора

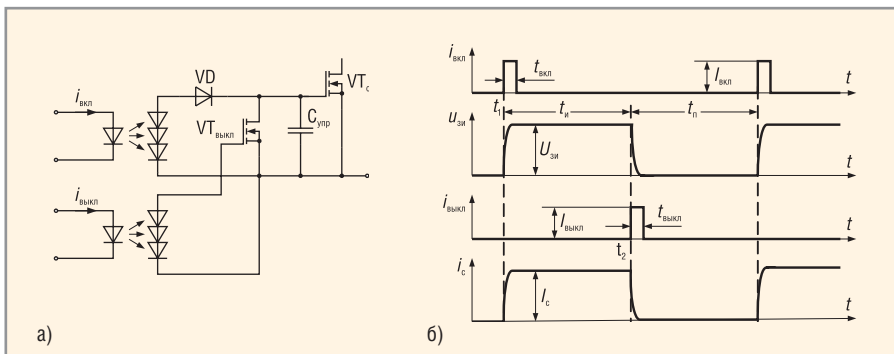


Рис. 6. Схема управления МОП-транзистором короткими импульсами тока (а) и временные диаграммы её работы (б)

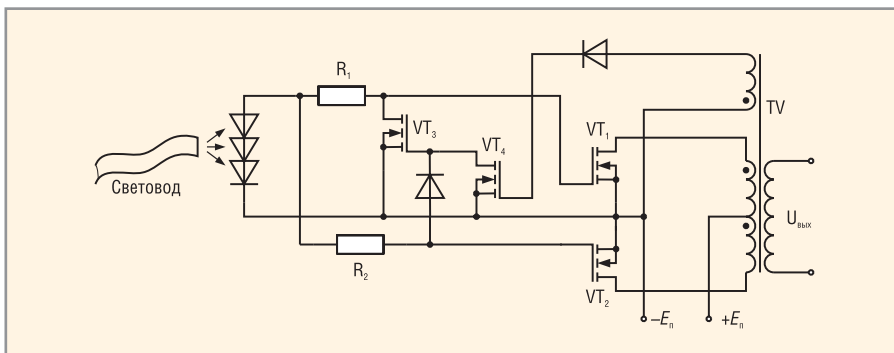


Рис. 7. Схема управления мощным силовым преобразователем

уменьшении числа  $k$  последовательно включенных фотодиодов, которое, однако, определяется напряжением  $U_{зи\ пор}$  МОП-транзистора.

Известны схемы МОП-транзисторных ключей, позволяющие уменьшить время  $t_{зд}^{1.0}$ . Две из них приведены на рисунке 5 [3].

В первой схеме (см. рис. 5а) биполярный выключающий транзистор  $VT_{выкл}$  открывается, когда напряжение на фотодиодах становится меньше, чем напряжение на входе силового транзистора  $VT_c$  (напряжение на ёмкости  $C_{зи}$ ). Это обуславливает уменьшение постоянной времени  $t_{выкл}$ , в которой роль  $R_{выкл}$  выполняет транзистор  $VT_{выкл}$ , работающий в режиме потребителя неизменного тока. Во второй схеме (см. рис. 5б) аналогичную функцию выполняет МОП-

транзистор  $VT_{выкл}$ . Области применения той или иной схемы могут быть определены после сравнения порогового напряжения включения биполярного транзистора  $U_{бэ0}$  и порогового напряжения включения МОП-транзистора  $U_{зи\ пор}$ . Необходимо учитывать, что практически выполняется неравенство  $U_{бэ0} \ll U_{зи\ пор}$ .

Недостатком схем приведённых на рисунке 5 МОП-транзисторных ключей является их невысокая энергетическая эффективность по входной цепи, так как управление ключом осуществляется током, протекающим через светодиод  $VD_{св}$  на протяжении длительности открытого состояния силового транзистора, которая в некоторых случаях бывает значительной. Это сводит на нет одно из основных преимуществ МОП-транзистора – его

высокое входное сопротивление  $R_{вх}$ , которое обуславливает минимизацию мощности на управление.

Однако свойство высокого входного сопротивления МОП-транзистора может быть использовано для снижения мощности управления транзисторным ключом при помощи использования определённых схемотехнических решений. Один из вариантов подобной схемы приведён на рисунке 6а, а временные диаграммы её работы – на рисунке 6б.

Здесь управление МОП-транзистором выполняется двумя относительно короткими импульсами  $t_{вкл}$  и  $t_{выкл}$  осуществляющими его включение и выключение соответственно. Введённый в схему конденсатор  $C$  заряжается до установившегося значения напряжения  $U_{зи}$  за интервал времени  $t_{вкл}$ . Для функционирования схемы рис. 6а необходимо, чтобы за время длительности импульса  $t_{и}$  конденсатор  $C$  разряжался незначительно и величина остаточного напряжения на нём удовлетворяла условиям обеспечения включенного состояния  $VT_c$ . Это практически может быть выполнено, так как входное сопротивление МОП-транзистора  $R_{вх} \rightarrow \infty$ .

Временные параметры транзисторного ключа схемы рис. 6а могут быть определены следующим образом. Очевидно, что время  $t_{зд}^{1.0}$  здесь будет больше, чем в схеме рис. 1, так как значение входной ёмкости в выражении для постоянной времени будет равно  $C_{\Sigma} = C_{зи} + C$ , что обуславливает увеличение  $t_{вкл}$ . Время  $t_{зд}^{1.0}$  задержки может быть найдено из выражения (5) при соответствующем изменении величины  $t_{вкл}$ . Разряд суммарной ёмкости конденсаторов  $C_{\Sigma}$  осуществляется на открытый транзистора  $VT_{выкл}$  вследствие чего постоянная времени входной цепи на выключение будет равна  $t_{выкл} = R_{откр} C_{\Sigma}$ , где  $R_{откр}$  – сопротивление открытого транзистора  $VT_{выкл}$ . На практике выполняется условие  $R_{откр} \ll R_{выкл}$ , потому для схемы рис. 6а время задержки  $t_{зд}^{1.0}$  будет меньше, чем для схемы рис. 1.

Сравнение по параметру  $t_{зд}^{1.0}$  схемы рис. 6а со схемами рис. 5 показывает преимущество первой. Это обусловлено тем, что транзистор  $VT_{выкл}$  в схеме рис. 6а включается и остаётся в этом состоянии в режиме, качественно эквивалентном режиму насыщения биполярного транзистора. По-

этому падение напряжения на нём мало и несущественно зависит от тока разряда ёмкости  $C_{\Sigma}$ .

Условием более высокой энергетической эффективности схемы транзисторного ключа, реализованного по схеме рис. 6а, является выполнение неравенств  $t_{\text{вкл}} \ll t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{выкл}} \ll t_{\text{н}}$ . Степень усиления этих неравенств определяет повышение энергетической эффективности ключа. При достаточно длительном включённом состоянии транзисторного ключа его энергетическая эффективность приближается к энергетической эффективности МОП-транзистора.

Применение средств оптоэлектроники для управления МОП-тран-

зисторами не ограничивается рассмотренными выше примерами. На рисунке 7 приведена схема мощного преобразователя напряжения, включение и выключение которого осуществляется при помощи сигнала, передаваемого по световоду. Применение средств оптоэлектроники позволило реализовать устройство, в котором при возникновении любого отказа элементов схемы исключено появление выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$ . Схема рис. 7 относится к классу безопасных электронных устройств, которые применяются в системах железнодорожной автоматики и телемеханики, управляющих движением поездов [4].

Очевидно, что при соответствующем анализе различных электронных устройств области применения МОП-транзисторов с оптоэлектронным управлением могут быть существенно расширены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Волович Г.* Драйверы силовых ключей. Современная электроника. 2007. № 8.
2. *Коняхин С., Свиридов П.* Оптронные устройства гальванической развязки. Электронные компоненты. 2007. № 7.
3. *Сергеев Б.* Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания. Радио и связь. 1992.
4. Пат. РФ № 2276032. Устройство контроля светофора. МПК В 61 L 5/18. *Б.С. Сергеев, Н.Б. Курченко.* Опубл. 2006 БИ №13. ©

## Новости мира News of the World Новости мира

### IBM играет с увеличительным стеклом

Компания IBM утверждает, что ей удалось серьёзным образом увеличить производительность солнечных батарей за счёт использования линзы, которая концентрирует поток солнечных лучей. Благодаря этому разработчики могут получать до 230 Вт энергии с одного квадратного сантиметра солнечной батареи. Если IBM действительно сможет вывести проект из лаборатории в производство, это поможет значительным образом снизить стоимость альтернативных способов получения энергии.



Главное достижение IBM заключается даже не в том, что её сотрудники проделали трюк с лупой, знакомый каждому мальчишке, а в том, что они научились охлаждать свои солнечные батареи. Концентрация такого огромного количества тепловых лучей на столь небольшом участке может расплавить сталь! Однако, используя различные решения, созданные инженерами для охлаждения центральных процессоров в компьютерах, им удалось снизить температуру панели всего до 85°C.

Первые результаты проведённых исследований будут продемонстрированы

специалистами на конференции IEEE Photovoltaic.

[physorg.com](http://physorg.com)

### CMOS-сенсоры OmniBSI: 0,9-мкм пиксели, вывернутые наизнанку

Сегодняшним пресс-релизом поставщик CMOS-сенсоров – компания OmniVision Technologies – представила новую сенсорную архитектуру OmniBSI. Радикальное отличие новой разработки OmniVision от традиционных CMOS-сенсоров с фронтальной регистрацией светового потока (front side illumination, FSI) заключается в реализации тыльной засветки светочувствительных сенсоров (backside illumination, BSI). По данным OmniVision, это позволяет повысить качество съёмки в условиях дальнейшего уменьшения габаритов сенсоров вплоть до 0,9-микронного размера.

Архитектура OmniBSI, разработанная OmniVision в тесном сотрудничестве с производственным партнёром TSMC, в буквальном смысле переворачивает CMOS сенсор «вверх ногами», если так будет уместно выразиться относительно чипа. Новая методика BSI предусматривает разворот сенсора CameraChip на 180° относительно плоскости регистрации световых потоков. Таким образом, свет попадает на светочувствительный сенсор с той стороны, которая раньше была тыльной, т.е. со стороны кремниевой подложки.

Традиционные «фронтальные» (FSI) сенсоры по пути к светочувствительным элементам теряют некоторую часть света при прохождении нескольких метал-

лических и диэлектрических слоёв, необходимых для преобразования энергии фотонов в энергию электронов. В некоторых случаях сенсоры с архитектурой FSI также могут блокировать или отражать часть света, создавая перекрёстную паразитную засветку соседних пикселей. По информации OmniVision, реверсивная архитектура BSI меняет порядок расположения слоёв на пути света и обеспечивает более качественную засветку светочувствительных элементов.

Более того, по данным компании, архитектура OmniBSI в конечном счёте также обеспечивает ряд других преимуществ перед традиционными CMOS-сенсорами, таких как повышение чувствительности на единицу площади, улучшение квантового выхода света, снижение взаимовлияния соседних пикселей и снижение неоднородности времени отклика пикселей в массиве. В конечном итоге новая технология позволит создавать более компактные сенсоры, не уступающие по качеству образцам с более крупным пикселем, и в перспективе даже может привести к дальнейшему снижению цены крупных сенсоров с десятками миллионов пикселей.

В настоящее время компания OmniVision демонстрирует готовый 8-мегапиксельный сенсор OmniBSI CameraChip и намерена начать поставки его образцов заинтересованным заказчикам ближе к концу июня. В планах компании – налаживание выпуска сенсоров OmniBSI CameraChip на производственных линиях с нормами до 0,11-мкм техпроцесса.

3dnews