

第4章 論理回路

4.1 半導体

半導体の電気的な性質は、電気をよく通す導体と電気を通さない絶縁体の間に位置します。主な成分はシリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) で、リン (P) やヒ素 (As) を少量混ぜた **N 形半導体** と、ホウ素 (B) やインジウム (In) を少量混ぜた **P 形半導体** があります (シリコンに対して 1000 万分の 1 の割合)。以後、シリコンを主成分とし、リンを含んだ N 形半導体とホウ素を含んだ P 形半導体について話を進めていきます。

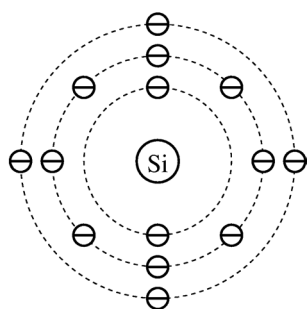


図 4.1: シリコンの原子構造

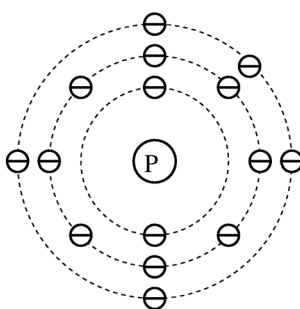


図 4.2: リンの原子構造

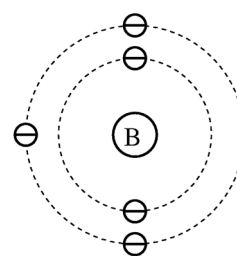


図 4.3: ホウ素の原子構造

高校の化学で習ったように、各原子は内側から K 殻・L 殻・M 殻といった殻があり、K 殻では 2 個・L 殻では 8 個・M 殻では 8 個の電子が存在することによって安定状態になることが知られています。従って、シリコン・リン・ホウ素の各原子の原子構造は上図のようになっています。また、シリコンは、図 4.4 のように隣り合う 4 つの原子からそれぞれ 1 個の電子を共有して、電氣的に安定した状態になります。このような結合を **共有結合** と呼びます。

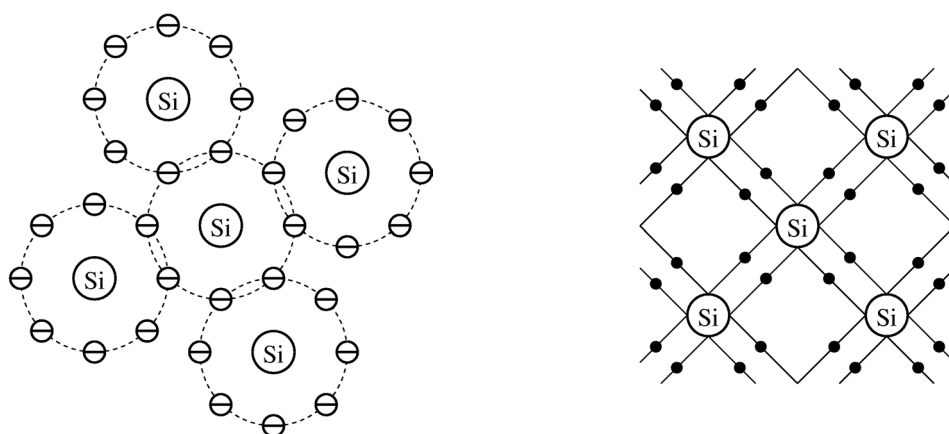


図 4.4: シリコンの共有結合

N 形半導体や P 形半導体は、シリコンに少量のリンやホウ素を混ぜて、電気的に不安定な状態を作ります。N 形半導体では、図 4.5 のようにリンの最外殻 (N 殻) の 5 つの電子のうち 4 つは共有結合に使われ、矢印で示した 1 個の電子が余った状態になります。逆に、P 形半導体では、図 4.6 のようにホウ素の最外殻 (M 殻) の 3 つの電子は共有結合を行います、電子が 1 個足りないため矢印で示した **ホール** と呼ばれる状態になります。

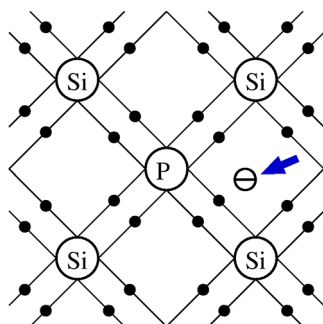


図 4.5: N 形半導体

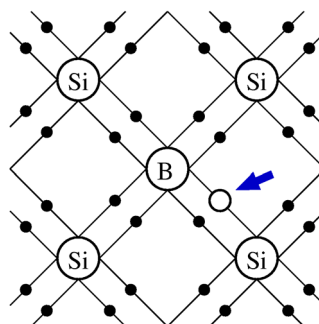


図 4.6: P 形半導体

本題に入りますが、上記で説明した N 形半導体と P 形半導体を組み合わせることで、論理回路の元となる電子部品が作られます。代表的なものには **ダイオード** と **トランジスタ** があります。

ダイオード ダイオードは、図 4.7 のように N 形半導体と P 形半導体を **PN 接合** することで、P 形半導体から N 形半導体への一方向しか電流を流さないという性質を持ちます。なお、P 形半導体の端子と N 形半導体の端子をそれぞれ **アノード** 及び **カソード** と呼び、ダイオードの回路記号は図 4.8 によって表示します。

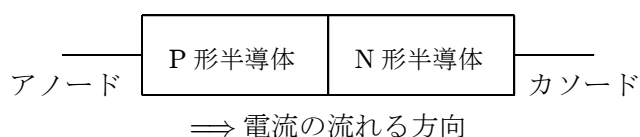


図 4.7: ダイオードの接合図

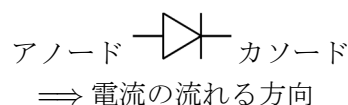


図 4.8: ダイオードの回路記号

ダイオードの働きについて詳しく見てみましょう。先ほど述べたように、ダイオードは、一定方向のみ電流を流す性質を持っていますが、図 4.9 のように電流が流れる場合を**順方向バイアス**と呼び、図 4.11 のように電流が流れない場合を**逆方向バイアス**と呼びます。順方向バイアスでは、電子はカソードからアノードへ流れようとするため、PN 接合面では N 形半導体の余った電子が P 形半導体のホールへ移動し、N 形半導体から P 形半導体へ電子が流れます。すなわち、P 形半導体に入った電子は図 4.10 のようにホールを動きながらアノードへ達し正極へ流れて行き、カソードでは負極から N 形半導体へ次々に電子を供給するので、回路に電流が流れます。

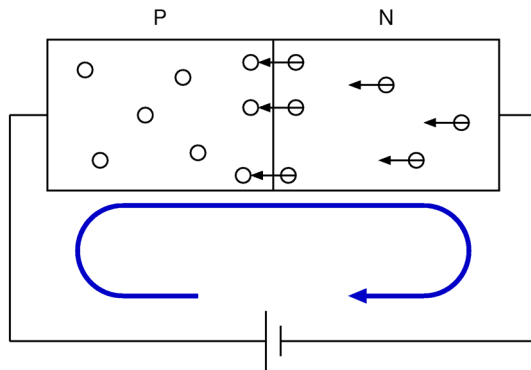


図 4.9: 順方向バイアス

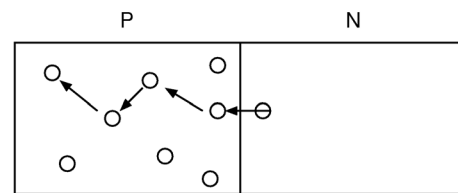


図 4.10: 電子の動き

逆に、逆方向バイアスでは、電子はアノードからカソードへ流れようとするため、N 形半導体の余った電子は正極へ流れ、P 形半導体では負極から供給された電子によってホールを埋めてしまいます。そのため、両方の半導体が電氣的に安定した状態となり、PN 接合面で電子のやり取りがなくなり、回路に電流が流れなくなります。なお、図 4.12 のように、逆方向バイアスではホールと電子が両極に移動すると解説されている場合もあります。これは、電子がホールを埋めるとき、あたかもホールが流れているように見えるためです。

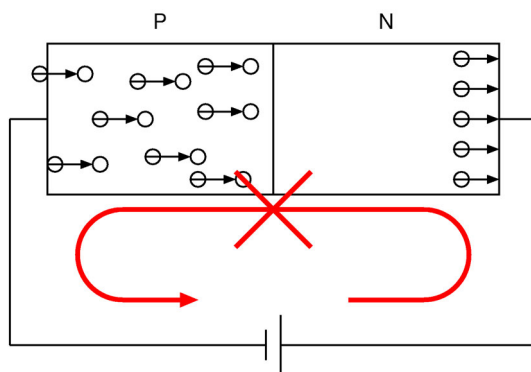


図 4.11: 逆方向バイアス



図 4.12: 電子とホール

トランジスタ トランジスタは、N形半導体とP形半導体を図4.13のように **NPN接合**または**PNP接合**したもので、各端子を**エミッタ・コレクタ・ベース**と呼び、ベースに(入力)電流を流すことでコレクタとエミッタに増幅した(出力)電流を流します。図4.14はNPN形トランジスタの回路記号を表し、図4.15はPNP形トランジスタの回路記号を表します。

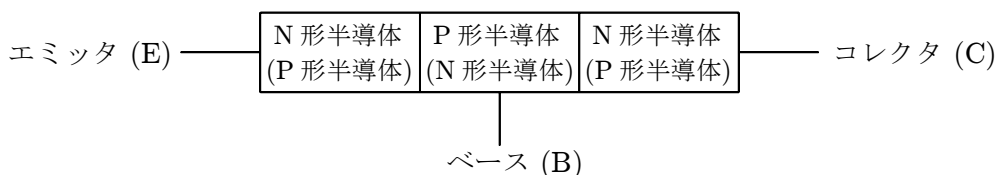


図 4.13: トランジスタの接合図

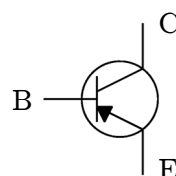
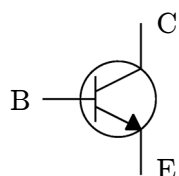


図 4.14: NPN 形トランジスタの回路記号

図 4.15: PNP 形トランジスタの回路記号

NPN形トランジスタの働きについて詳しく見ていきましょう。図4.16のようにベースに電流が流れていない場合は、回路右側のPN接合部がダイオードの逆方向バイアスと同じようになり電流が流れなくなります。逆に、図4.17のようにベースに電流が流れている場合は、回路左側のNP接合部がダイオードの順方向バイアスと同じようになり、エミッタからコレクタへ電流が流れるようになります。このとき、コレクタ—ベース間よりコレクタ—エミッタ間の電圧が高いため、ほとんどの電子はP形半導体を突き抜けてエミッタに流れてしまいます。なお、エミッタからコレクタへ流れる電流の量はベースへ流す電流に対応して変化しますが、これは、ベースを水道の蛇口に例えると、電流の流量は水量に例えることができます。

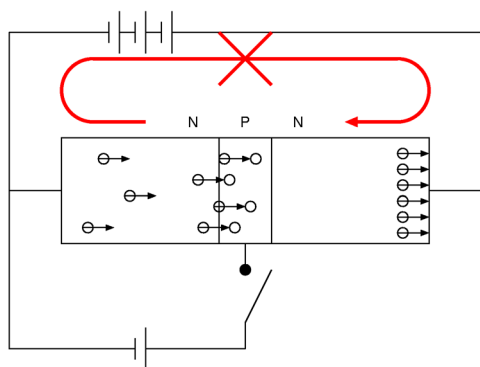


図 4.16: ベース電流を流さない場合

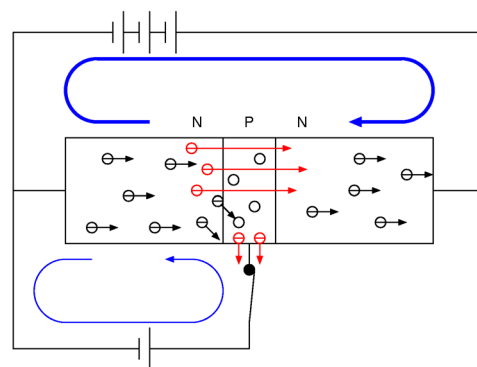


図 4.17: ベース電流を流した場合

問題 1 電子とホールに注目して、PNP形トランジスタの働きを解説しなさい。

4.2 論理素子

論理素子は論理演算を回路で実現したもので、真理値 1 および 0 に対応する 2 つの状態を安定して表せる論理素子が必要となります。現代のコンピュータは半導体によって実現されていますが、半導体が発明されるまでは**電磁リレー**や**真空管**を使用していました。そのような背景から、構成される論理素子の違いによってコンピュータの世代が特徴づけられていて、第 1 世代は真空管、第 2 世代は個別の半導体トランジスタ、第 3 世代は半導体の集積回路 (IC: Integrated Circuit)、第 4 世代は集積度の高い大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integrated circuit) に分類されます。現在は第 4 世代にあたります。

半導体による論理素子では、電圧の高い状態 H (High) と低い状態 L (Low) を真理値の 1 と 0 に対応させて考えますが、電圧の高い状態を 1 に低い状態を 0 に対応させた**正論理** (positive logic) と、高い状態を 0 に低い状態を 1 に対応させた**負論理** (negative logic) があります。このテキストでは全て正論理で解釈します。従って、基本的な論理演算である AND 回路と OR 回路は、2 個のダイオードを使って図 4.18 と図 4.19 のように構成することができます。なお、図中の A と B は入力端子、 X は出力端子、 $+V$ は正極¹、GND (0V) は負極²を表します。

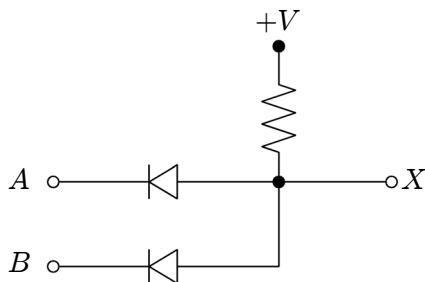


図 4.18: AND 回路

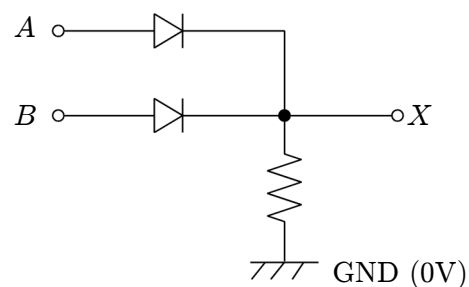
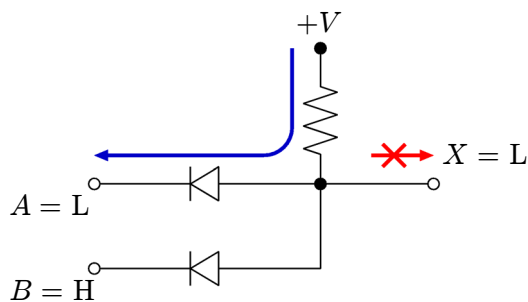
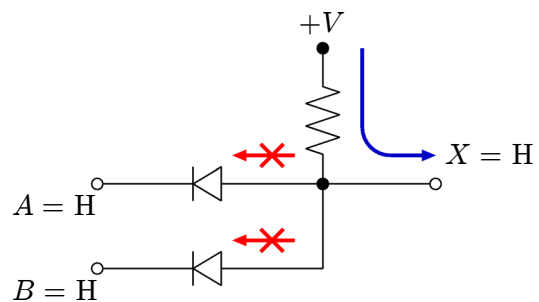


図 4.19: OR 回路

図 4.18 の AND 回路について動作を詳しく見てみましょう。図 4.20 のように、入力端子に低い電圧の状態を含む場合、電流は電圧の低い入力端子に流れるため、出力端子の電圧は L になります。逆に、図 4.21 の場合、ダイオードの両端の電圧が等しいため電流は出力端子に流れ、出力端子の電圧は H になります。従って、この回路は論理積の働きをすることがわかります。

図 4.20: $A = L$ かつ $B = H$ の場合図 4.21: $A = H$ かつ $B = H$ の場合

¹デジタル回路の専門書では V_{cc} などと記載され、回路に必要な電圧を示しています。

²GND は GrouND の略記で、「接地」とか「アース」などと呼ばれる場合もあります。

同様に、図 4.19 の OR 回路は論理和の働きをすることがわかります。

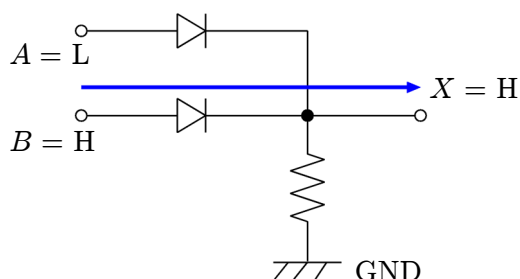


図 4.22: $A = L$ かつ $B = H$ の場合

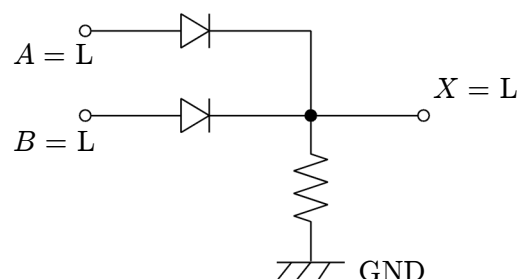


図 4.23: $A = L$ かつ $B = L$ の場合

NOT 回路については、トランジスタを使って図 4.24 のように構成することができます。入力端子の電圧が H の場合、図 4.25 のようにトランジスタのベースに電流が流れるため、図の電圧 $+V$ によって流れる電流は電圧の低い GND に流れてしまい、出力端子の電圧は L となります。逆に、入力端子の電圧が L の場合、図 4.26 のようにトランジスタのベースに電流が流れないため、図の電圧 $+V$ によって流れる電流は出力端子に流れ、出力端子の電圧は H となります。従って、この回路も否定の働きをすることがわかります。

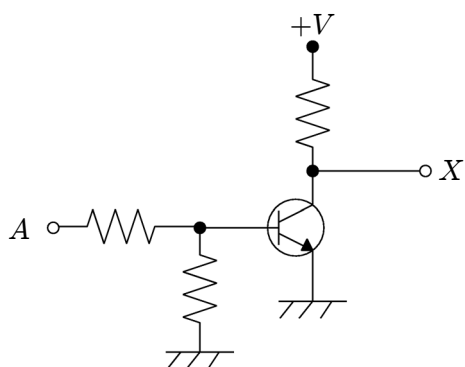


図 4.24: NOT 回路

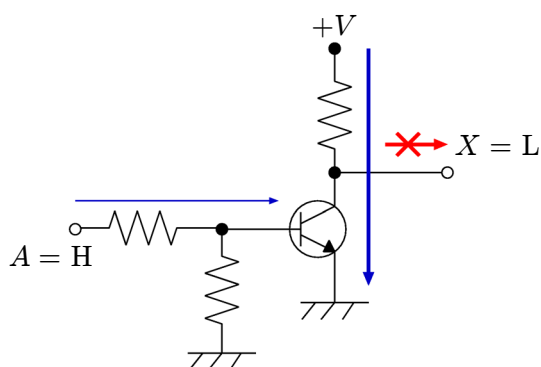


図 4.25: $A = H$ の場合

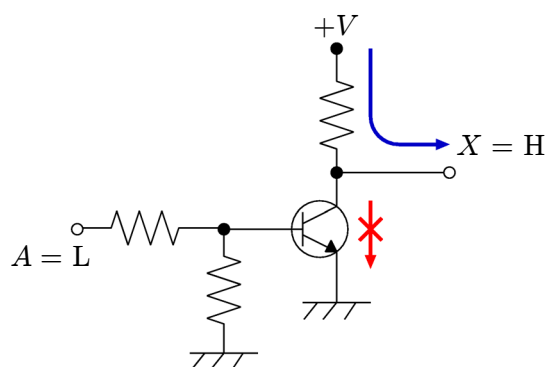


図 4.26: $A = L$ の場合

以上のことより、3.4 節で述べた 1 つの演算で最小万能演算系となる否定論理積の論理素子である NAND 回路は、図 4.27 のように構成することができます。

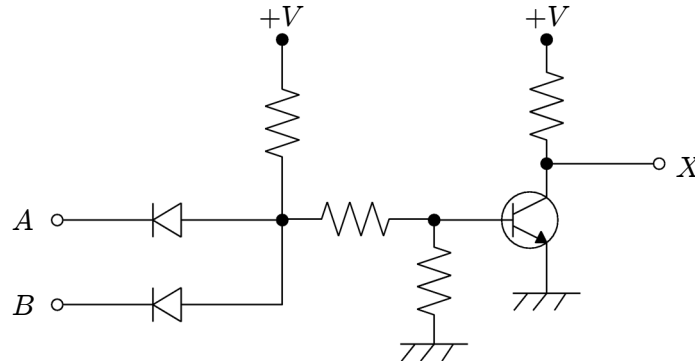


図 4.27: NAND 回路

論理回路を電子部品で書き表すと煩雑となるので、論理素子を簡略化した **MIL 記号**を導入しましょう。MIL 記号は、コンピュータが戦争によって発達してきたという歴史的背景もあり、もともとアメリカ合衆国の軍隊で使われていたもので、一般社会でもこの記号が使われるようになりました³。図 4.28 は MIL 記号の代表的なもので、左側が入力、右側が出力となります。

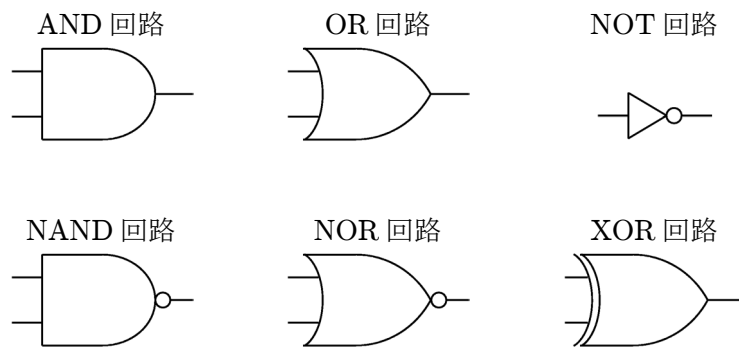


図 4.28: MIL 記号

以後、電圧の高い状態 H を 1 で表し、電圧の低い状態 L を 0 で表す。

$$\begin{cases} 1 \iff \text{電圧の高い状態 H} \\ 0 \iff \text{電圧の低い状態 L} \end{cases}$$

³軍事目的で開発された技術が一般社会に還元された例の一つです。「インターネット」もその一つ。

なお、3.3 節で述べたように否定論理積で全ての論理関数を表せますから、論理回路についても NAND 回路のみで全ての論理回路を構成することができます。例えば、図 4.29 のように NAND 回路を用いて基本回路を構成することができます (p.48 の表 3.5 参考)。

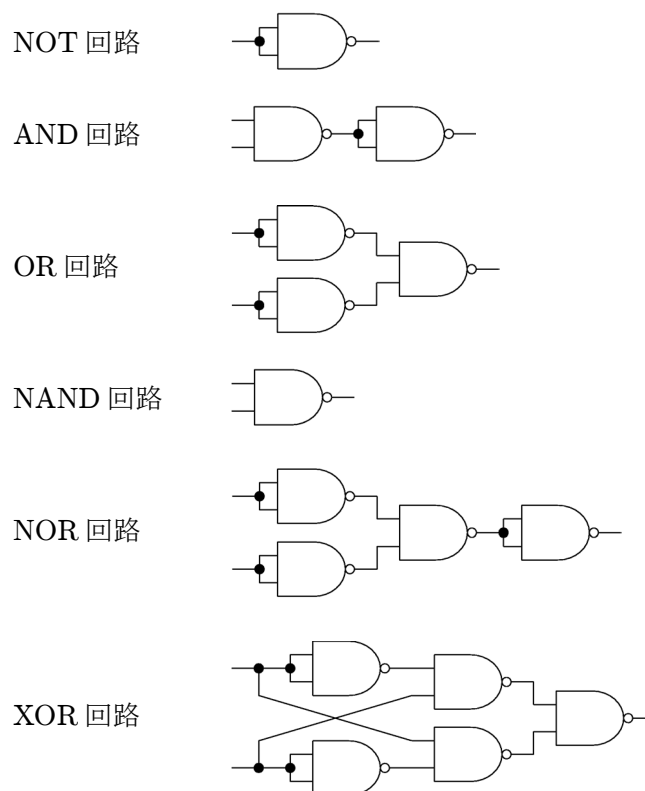
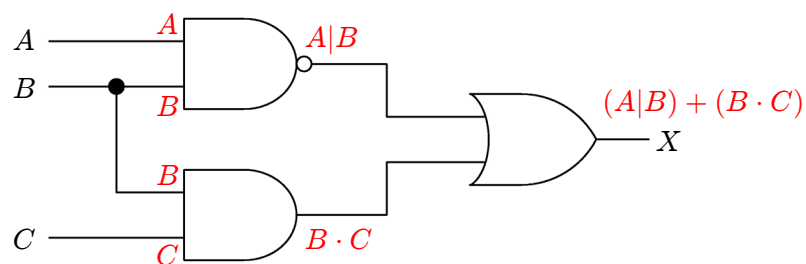


図 4.29: NAND 回路による基本回路の構成

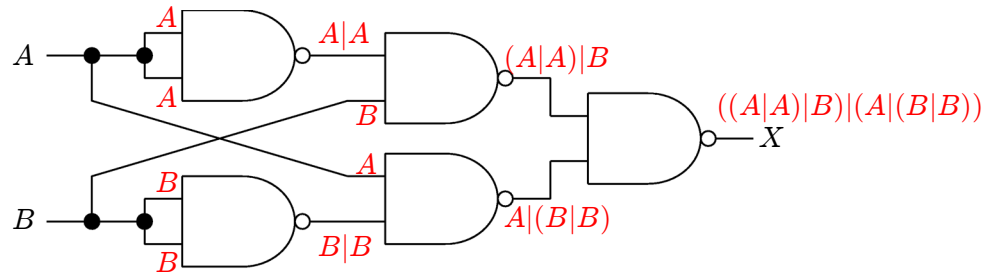
例題 1 次の論理回路で表される論理関数を求めなさい。



解答例 図より、論理関数 X は $A|B + B \cdot C$ となる。

* 入力側から出力側に向かってラインを順に追って行けばよい。

例題 2 次の論理回路で表される論理関数 X を求めなさい。

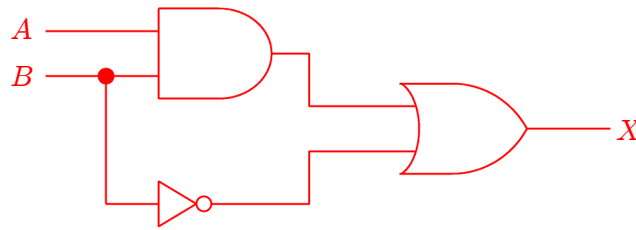


解答例 図より、論理関数 X は $((A|A)|B)|(A|(B|B))$ となる。

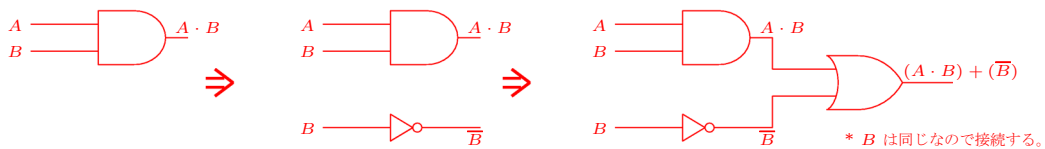
* 入力側から出力側に向かってラインを順に追って行けばよい。

例題 3 論理関数 $X = A \cdot B + \overline{B}$ を実現する回路を作りなさい。

解答例 $A \cdot B + \overline{B} = (A \cdot B) + (\overline{B})$ であるから

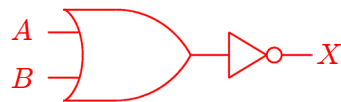


回路の描き方

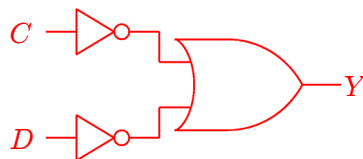


例題 4 NOT 回路と OR 回路を使って NOR 回路と NAND 回路を作りなさい。

解答例 NOR 回路 X の論理関数は $A \downarrow B = \overline{A + B}$ であるから



また、NAND 回路 Y の論理関数は $C \mid D = \overline{C \cdot D} = \overline{C} + \overline{D}$ であるから



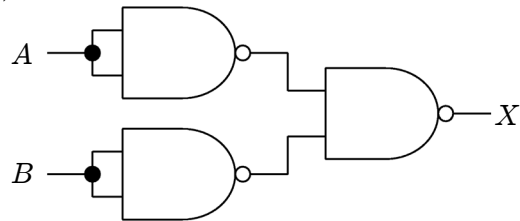
問題 1 OR 回路の動作について詳しく述べなさい。

問題 2 負論理では、図 4.18 は OR 回路に、図 4.19 は AND 回路になる。理由を述べなさい。

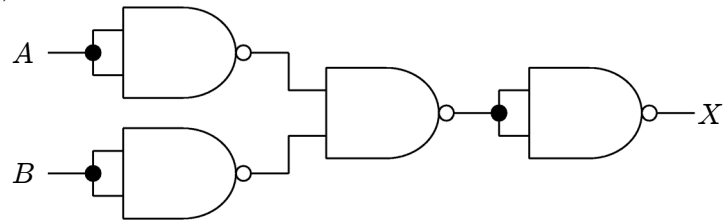
問題 3 NOR 回路のみを使って基本回路を構成しなさい。

問題 4 次の論理回路で表される論理関数 X を求めなさい。

(1)



(2)



問題 5 NAND 回路のみを使って論理関数 $X = (A \cdot B + C \cdot D) \cdot \overline{D}$ を実現する回路を作りなさい。